



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ภาควิชา

เรื่อง ความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัส เมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมจาก
ของเหลวที่ไม่ใช้น้ำ

Surface Wettability using Contact Angle Measurement of Mixed Nonaqueous Phase
Liquid Contamination

นามผู้วิจัย นางสาวจิรายุ คงสมแก้ว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จีมา ศรีลัมพ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสเมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมจากของเหลวที่
ไม่ใช่ไขมัน

Surface Wettability using Contact Angle Measurement of Mixed Nonaqueous Phase Liquid
Contamination

โดย

นางสาวจิรายุ คงสมแก้ว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2552

จิรายุ คงสมแก้ว 2552: ความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัส เมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมจากของเหลวที่ไม่ใช้น้ำ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิม่า ศรีสัมพันธ์, Ph.D. 110 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถเปียกได้หรือ wettability ของพื้นผิวโดยวิธีการวัดมุมสัมผัสจากภาพถ่ายดิจิทัลด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 (trial version) ซึ่งของเหลวที่ไม่ใช้น้ำหรือ NAPL (nonaqueous phase liquid) เป็นปัญหาที่สำคัญของการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน โดยในพื้นที่จริงจะมีการปนเปื้อนผสมระหว่าง DNAPL และ LNAPL จึงเลือก TCE เป็นตัวแทนของ DNAPL และ Toluene เป็นตัวแทนของ LNAPL โดยเลือกซิลิคอนและควอตซ์เป็นตัวแทนของดินเนื่องจากเป็นแร่ธาตุที่พบมากที่สุดในดิน ทำการทดลอง 3 ส่วน คือ การวัดค่าการละลายน้ำของ TCE และ Toluene เพื่อนำไปหาเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ การเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัส, การวัดมุมสัมผัสระหว่าง NAPL กับของแข็งเมื่อมีการปนเปื้อนเพียงสารเดียว (ภายใต้ น้ำใต้ดินจำลอง) และการปนเปื้อนแบบผสม (ภายใต้สารละลาย NAPL ในน้ำใต้ดินจำลอง) เพื่อศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิว ที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียวกับพื้นผิวที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม และการวัดมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ เปรียบเทียบเมื่อของแข็งที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL กับของแข็งที่มีการปนเปื้อน NAPL เพื่อพิสูจน์ว่าลักษณะการเปียกของพื้นผิวสามารถเปลี่ยนได้

ผลการวิจัยพบว่าการละลายร่วมกันของ TCE และ Toluene ในน้ำไม่มีผลต่อความสามารถในการละลายของ TCE หรือ Toluene เพียงสารเดียวในน้ำ โดยที่มีการละลายจนกระทั่งมีความเข้มข้นของ NAPL ในน้ำเท่ากับค่าความสามารถในการละลายน้ำภายในเวลา 1 ชั่วโมง และเมื่อวัดมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene บนผิวของซิลิคอนหรือควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยของเหลว ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว มุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นน้อยกว่า 65 องศา พื้นผิวมีลักษณะเปียกน้ำ (strongly water-wet) และกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม มุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นอยู่ในช่วง 65 ถึง 105 องศา พื้นผิวมีลักษณะเปียกผสม (intermediate wet) ทำที่สุดแล้วการปนเปื้อนทั้ง 2 กรณี ทำให้พื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์เปลี่ยนเป็นเปียกน้ำมัน (strongly oil-wet) และมุมสัมผัสก่อนข้างคงที่หลังจากผ่านไป 756 ชั่วโมง เนื่องจากการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นตลอดการทดลองวัดมุมสัมผัส ทำให้มุมสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลง จึงถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสจนกระทั่งมุมสัมผัสก่อนข้างคงที่และมวลของ NAPL ลดลงจนเหลือน้อยมาก ซึ่งพบว่าควอตซ์เป็น water wetting solid มากกว่าซิลิคอน และการวัดมุมสัมผัสในสถานะที่ล้อมรอบด้วยอากาศ มุมสัมผัสของน้ำมันแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ในกรณีที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL มีมุมสัมผัสอยู่ในช่วง 155.4 ถึง 168.1 องศา ซึ่งผิวของซิลิคอนและควอตซ์มีคุณสมบัติเป็นผิวที่ชอบน้ำ (hydrophilic) จากนั้นวัดมุมสัมผัสของน้ำมันแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL มุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 107.0 ถึง 115.6 องศา ซึ่งผิวของซิลิคอนและควอตซ์มีคุณสมบัติเป็นผิวที่ไม่ชอบน้ำ แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติในการเปียกได้ และพบว่าซิลิคอนเป็น water wetting solid มากกว่าควอตซ์

Jirayu Kongsomkaew 2009: Surface Wettability using Contact Angle Measurement of Mixed Nonaqueous Phase Liquid Contamination. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Cheema Soralum, Ph.D. 110 pages.

This research was conducted to study the wettability of solid surface from the digital image. The change in wettability was measured by visualizing and measuring contact angle with Adobe Photoshop CS2 (trial version) program. The contamination in subsurface is NAPL (nonaqueous phase liquid). In the field, NAPL contamination could be in the form of mixture between light NAPL (LNAPL) and dense NAPL (DNAPL). In this research, toluene represented LNAPL and trichloroethylene (TCE) represented DNAPL. The silicon wafer and quartz wafer were used as the solid surface and represented soil surface. Because of, Silicon is the element that meets the most in the earth crust. The study consisted of 3 parts; TCE and toluene dissolution, the surface wettability when NAPL adhere to the surface surrounded by solute NAPL only and surrounded by mixed NAPL and the surface wettability when the surface has contaminated with NAPL and the surface has no contamination surrounded by air.

The cosolvention of TCE and Toluene in the water compare with only TCE dissolution and only Toluene dissolution was insignificant different. The cosolvent and pure NAPL dissolution were dissolved until the concentration into water reach to the solubility in 1 hour. The contact angle of TCE and Toluene on silicon or quartz surface surrounded by liquid. In case, one NAPL contamination on silicon or quartz surface, at the beginning the contact angle of TCE NAPL and toluene NAPL were considered strongly water-wet with contact angle less than 65 degrees. And the case, mixed NAPL contamination on silicon or quartz surface, the contact angle of TCE NAPL and Toluene NAPL were considered intermediate wet with contact angle 65 to 105 degrees, when experiments proceeded it was found that NAPL could make the surface properties of solid surface change to strongly oil-wet and after 756 hours, it leveled off. And quartz was water wetting solid more than silicon. Hence, the images were taken until the contact angle leveled off. Mass of NAPL was decreased and small. Because there was mass transferred in the experimental system. That NAPL could make the concentration and contact angle change. The contact angle of water on silicon and quartz surface has no contamination surrounded by air. Contact angles were measured during 155.4 to 168.1 degrees. The surface of silicon and quartz was hydrophilic. And the contact angle of water on silicon and quartz surface has contaminated with NAPL. Contact angles were measured during 107.0 to 115.6 degrees. The surface of silicon and quartz was hydrophobic and silicon was water wetting solid more than quartz. The result was found that NAPL could make the surface properties of solid surface change. So the wetting characteristics could change when the saturated soil had NAPL adhere the surface.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีมา ศรีลัมพ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตัณญา สิริวิทยาปกรณ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
ผู้ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการนำบทความไปเผยแพร่ในการประชุม
วิชาการ The 6th Regional Symposium on Infrastructure Development และเสียสละเวลาในการ
ตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธสิริศร์ ศรีลัมพ์ ที่ให้คำปรึกษาและความอนุเคราะห์ห้องที่ใช้ในการ
ทดลอง กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา ประธานการสอบ และ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียร ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะอันมีประโยชน์
อย่างยิ่งแก่ผู้วิจัย อีกทั้งได้กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และ
ขอขอบพระคุณคุณชาญเดช หรือนันต์ งานวิจัย ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีไมโคร
อิเล็กทรอนิกส์ จ.ฉะเชิงเทรา ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและแผ่นซิลิคอนในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่น
ใหม่ ผู้วิจัยขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโททุกท่าน และเพื่อนร่วมรุ่นปริญญาโท เจ้าหน้าที่ภาควิชา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ใน
การวิจัยครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณยาย พี่ชาย และพี่สาวผู้ซึ่งสร้าง
ครอบครัวที่อบอุ่น ผู้เป็นความรักและกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ให้แก่ข้าพเจ้า โดยเฉพาะคุณพ่อและคุณแม่ผู้
ซึ่งเป็นแรงบันดาลใจให้การสนับสนุนข้าพเจ้าเสมอมา

จิรายุ คงสมแก้ว

กุมภาพันธ์ 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	35
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	85
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานและการคำนวณ	90
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกผลการทดลอง	98
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	110

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความสามารถในการละลายน้ำ (mg/L) ของ chlorinated solvent compounds ที่อุณหภูมิ 23 ถึง 25°C	14
2	มุมสัมผัสของน้ำบนของแข็ง ซึ่งมีของเหลวอีกชนิดอยู่ด้วย	19
3	ผลการทดลองมุมสัมผัสของ DNAPL บนพื้นผิวต่างชนิดกัน	20
4	Trichloroethylene (TCE)	24
5	Toluene	25
6	คุณสมบัติเฉพาะของแผ่นซิลิกอน	32
7	Sensitivity (สภาพไว) ของการวัดมุมโดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS2 (trial version)	49
8	มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing angle) และมุมสัมผัสสุดท้าย (receding angle) ของการทดลองวัดมุมสัมผัส NAPL บนของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยของเหลวอีกชนิด	66
9	เปรียบเทียบมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับของแข็งต่างชนิดกัน ในกรณีที่ของแข็งไม่มีการปนเปื้อน NAPL และของแข็งที่มีการปนเปื้อน NAPL	80

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การดูระยะระหว่างดินกับน้ำด้วย adhesive force และ cohesive force	5
2	micropore และ macropore	6
3	การแบ่งชั้นความชื้นใต้ผิวดินเหนือชั้นน้ำบาดาล	7
4	ลักษณะดินและชั้นน้ำใต้ดิน	8
5	แผนภาพการแทรกซึมของ LNAPL ในน้ำใต้ดิน	12
6	แผนภาพการแทรกซึมของ DNAPL ในน้ำใต้ดิน	13
7	มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ	16
8	การแทรกตัวของ NAPL ระหว่างเม็ดดินและน้ำ	16
9	มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งที่เป็น strongly water-wet ล้อมรอบด้วยน้ำ	17
10	มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งที่เป็น strongly oil-wet ล้อมรอบด้วยน้ำ	17
11	อิทธิพลของมุมสัมผัส	18
12	หยดของเหลวที่เอียงจากระนาบด้วยมุม α	19
13	LNAPL ที่รวมตัวมีลักษณะคล้ายแอ่งน้ำหรือ plume น้ำมัน ซึ่งบันทึกจากภาพถ่ายดิจิทัล	27
14	การจัดวางการทดลองวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีการหยดของเหลวแบบ sandwich	28
15	แบบจำลองโครงข่ายช่องว่างอนุภาคของดินซึ่งมีขนาดเล็กมาก ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	29
16	เซลล์วัดมุมสัมผัสทำด้วยพลาสติกอะคริลิก ภายในบรรจุสารละลาย Toluene วัดมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน	32
17	แผนผังการทดลอง	34
18	แผนผังการทดลองส่วนที่ 1 การวัดค่าการละลายน้ำของ NAPL	36
19	เซลล์วัดมุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นซิลิคอน ภายใต้สารละลาย Toluene	38
20	เซลล์วัดมุมสัมผัส ระหว่าง Toluene กับแผ่นซิลิคอนภายใต้สารละลาย TCE	39
21	การเลือกคำสั่ง filter ในโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	การเลือก line tool ในโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)	42
23	การเลือก pen tool ในโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)	42
24	ขอบที่วัดได้จากคำสั่ง pen tool ในโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)	43
25	การใช้ measure tool หาขนาดของมุมสัมผัสระหว่างแผ่นควอตซ์กับ TCE ซึ่งวัดได้ 42.2 องศา	43
26	เส้นแสดงขนาดของมุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นควอตซ์ ด้วยคำสั่ง line tool	44
27	การรวม layer โดยใช้ group into new smart object	44
28	มุมสัมผัสที่วัดจากรูปดิจิทัลด้วยโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)	45
29	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ TCE ในน้ำกับเวลา	46
30	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Toluene ในน้ำกับเวลา	47
31	ความเข้มข้นของ TCE และ Toluene ซึ่งละลายร่วมกันในน้ำเทียบกับเวลา	48
32	มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ	51
33	การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของ TCE บนแผ่นซิลิคอนซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ความละเอียดของภาพ 0.03 cm/pixel	52
34	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอนซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำกับเวลา	53
35	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำกับเวลา	54
36	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene กับเวลา	55
37	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene กับเวลา	56
38	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำกับเวลา	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ กับเวลา	59
40	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วย สารละลาย TCE กับเวลา	60
41	มุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE	62
42	การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ซึ่ง ล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE ความละเอียดของภาพ 0.03 cm/pixel	63
43	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วย สารละลาย TCE กับเวลา	64
44	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็ง	65
45	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ	67
46	เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอนและควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว	68
47	เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอนและควอตซ์ เมื่อมีการ ปนเปื้อน NAPL สารเดียว	69
48	เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอนและควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน ผสม	69
49	เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอนและควอตซ์ เมื่อมีการ ปนเปื้อน NAPL แบบผสม	70
50	เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นซิลิกอน เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียว	71
51	เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นซิลิกอน เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	เปรียบเทียบมุลัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียว	72
53	เปรียบเทียบมุลัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม	72
54	เปรียบเทียบมุลัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม	73
55	เปรียบเทียบมุลัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม	74
56	เปรียบเทียบมุลัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิคอน เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม	75
57	เปรียบเทียบมุลัมผัสของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม	76
58	มุลัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE (ซ้าย) และที่มีการปนเปื้อน TCE (ขวา) ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ	77
59	มุลัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE (ซ้าย) และที่มีการปนเปื้อน TCE (ขวา) ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ	78
60	มุลัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene (ซ้าย) และที่มีการปนเปื้อน Toluene (ขวา) ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ	79
61	มุลัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene (ซ้าย) และที่มีการปนเปื้อน Toluene (ขวา) ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ	79

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ลบ.น้ำ	=	ลูกบาศก์น้ำ
ม./วินาที	=	เมตรต่อวินาที
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
GC	=	gas chromatography
SPME	=	solid phase micro extraction
BTEX	=	benzene, toluene, ethyl benzene and xylene
N/m^2	=	นิวตันต่อตารางเมตร
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
mbar	=	มิลลิบาร์
mg/L	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/kg	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
g/mol	=	กรัมต่อโมล
M	=	โมลาร์
cm	=	เซนติเมตร
mm	=	มิลลิเมตร
cm/pixel	=	เซนติเมตรต่อจุดภาพ
$^{\circ}$	=	องศา
%	=	เปอร์เซ็นต์
Pa	=	pascal

ความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสเมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสม จากของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ

Surface Wettability using Contact Angle Measurement of Mixed Nonaqueous Phase Liquid Contamination

คำนำ

ปัจจุบันของเสียที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ ทั่วประเทศ เช่น อุตสาหกรรม เกษตรกรรม บ้านเรือน ได้กลายเป็นปัญหาที่ต้องดำเนินการแก้ไขโดยเร่งด่วน ทั้งนี้เนื่องจากการทิ้งของเสียอันตรายปะปนไปกับขยะทั่วไป การกำจัดของเสียอันตรายอย่างถูกต้องตามหลักสากลยังดำเนินการไม่ทันกับสภาพปัญหาที่เกิดขึ้น ทั้งในด้านปริมาณของเสียอันตรายที่มากเกินไป ความสามารถในการกำจัดและความหลากหลายของชนิดของเสียอันตรายที่ทำให้ยากในการกำจัด เนื่องจากต้องอาศัยทั้งเทคโนโลยีและการลงทุนที่สูง ทำให้ของเสียอันตรายปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและห่วงโซ่อาหารส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและทำให้รัฐต้องสูญเสียเงินมหาศาลในการแก้ไขปัญหาจากการกำจัดของเสียอันตรายที่ไม่ถูกวิธี

การปนเปื้อนของของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ (nonaqueous phase liquid, NAPL) ซึ่งส่วนใหญ่พบในพื้นที่กำจัดขยะอันตราย นอกจากนั้น NAPL ยังเป็นตัวชี้วัดถึงปัญหาการปนเปื้อนจากการเก็บถังไว้ใต้ดิน สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม รวมถึง NAPL ซึ่งประกอบด้วย chlorinated hydrocarbons และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม (Mercer and Cohen, 1990) ก่อให้เกิดความเสียหายต่อดินและแหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งในสถานการณ์การปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจริงมีการปนเปื้อนผสมระหว่าง NAPL ที่หนักกว่าน้ำ (dense nonaqueous phase liquid) และเบากว่าน้ำ (light nonaqueous phase liquid) ดังตัวอย่างของปัญหาที่เกิดขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกาในปีค.ศ. 1974 โดยการประมาณค่าจากปริมาณตัวทำละลายเพียงอย่างเดียว 310,200 ตันซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการกำจัดน้ำมันและถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงใต้ดินประมาณ 796,000 ถัง (Mercer and Cohen, 1990) ความสามารถในการเปียกได้ หรือ wettability เป็นกลไกหนึ่งที่ควบคุมลักษณะการปนเปื้อนของ NAPL จากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาความเข้าใจเรื่องลักษณะการปนเปื้อนและการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนที่เป็นของเหลวไม่ใช่น้ำมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นองค์ความรู้หนึ่งด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่

ยังต้องการการพัฒนาเพื่อการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนตลอดจนนำความรู้ที่ได้ไปใช้งานในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนจริงซึ่งมีความซับซ้อนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้เลือก trichloroethylene (TCE) เป็นตัวแทน DNAPL และ Toluene เป็นตัวแทน LNAPL ศึกษามุมสัมผัส (contact angle, θ) ระหว่าง NAPL และของแข็งในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม (TCE – Toluene) และกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงชนิดเดียว (Toluene หรือ TCE)

คำสำคัญ (keywords) ความสามารถในการเปียกได้ (wettability), ของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ (nonaqueous phase liquid, NAPL), มุมสัมผัส (contact angle, θ), เปียกผสม (intermediate wet)

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้คือ การศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัส โดยมีวัตถุประสงค์ย่อยดังต่อไปนี้

1. เพื่อหาค่าความสามารถในการละลายน้ำของ NAPL ในช่วงเวลาต่าง ๆ เมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสม และนำไปหาเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัส
2. เพื่อศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิว เมื่อมี NAPL มาเกาะติดที่ผิวในสภาวะที่ล้อมรอบด้วยน้ำปนเปื้อน NAPL ชนิดเดียวและแบบผสม
3. เพื่อพิสูจน์ว่าลักษณะการเปียกของพื้นผิวสามารถเปลี่ยนได้

การตรวจเอกสาร

1. ดิน (soil)

ดินคือเทหวัตถุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติรวมกันขึ้นเป็นชั้น (profile) จากส่วนผสมของแร่ธาตุต่าง ๆ ที่ถูกสลายตัวเป็นชั้นเล็กกับอินทรีย์วัตถุที่เปื่อยผุพังอยู่รวมกันเป็นชั้นบาง ๆ ห่อหุ้มผิวโลก และเมื่อมีอากาศและน้ำเป็นปริมาณที่เหมาะสมแล้วจะช่วยค้ำจุนพร้อมทั้งช่วยในการยังชีพและการเจริญเติบโตของพืช (คณะอาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2510)

1.1 ส่วนประกอบของดิน (soil component)

ก) Mineral material (inorganic matter) เป็นส่วนที่เกิดจากชิ้นเล็ก ๆ ของแร่ธาตุที่สลายตัวโดยทางเคมี

ข) Organic matter (O.M.) เป็นส่วนที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังหรือการสลายตัวของเศษเหลือของพืชและสัตว์ที่ทับถมกันอยู่บนดิน

ค) Water น้ำที่อยู่ในดินนั้น จะพบในช่องว่างระหว่างก้อนดิน (aggregate) หรืออนุภาคดิน (particle) เรียกช่องว่างนี้ว่า pore space

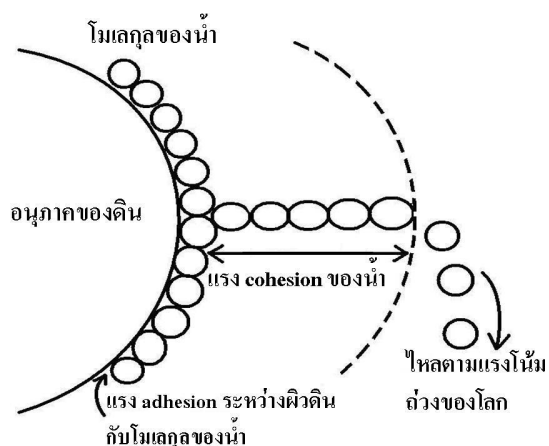
ง) Air ช่องว่างในดินระหว่างก้อนดินและอนุภาคดินนั้นมีอากาศปนอยู่ด้วย แก๊สที่พบโดยทั่วไปในอากาศในดินนั้นมี N_2 , O_2 , และ CO_2

1.2 สมบัติบางประการของดิน

องค์ประกอบทางเคมีจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบกำเนิดดิน ทำให้มีสัดส่วนและปริมาณของธาตุแตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปดินจะประกอบด้วยของแข็งร้อยละ 45-50 ในส่วนของแข็งนี้จะมีแร่ธาตุร้อยละ 95-99 มีซิลิกอน อะลูมิเนียม เหล็ก และออกซิเจนเป็นธาตุที่พบมากที่สุดในการเปลือกโลก โดยธาตุยังสร้างพันธะกับธาตุอื่น ๆ ที่พบในปริมาณที่น้อยกว่าเช่น ควอตซ์คือ SiO_2 (วีรานุช, 2551)

สามารถกล่าวโดยสรุปว่าเนื่องจากซิลิกอนเป็นแร่ธาตุที่พบมากที่สุดในดิน ในงานวิจัยนี้จึงเลือกซิลิกอนและควอตซ์เป็นตัวแทนของดิน

2. พลังงานที่เกี่ยวข้องกับสภาพของการยืดยึดน้ำไว้ของดิน

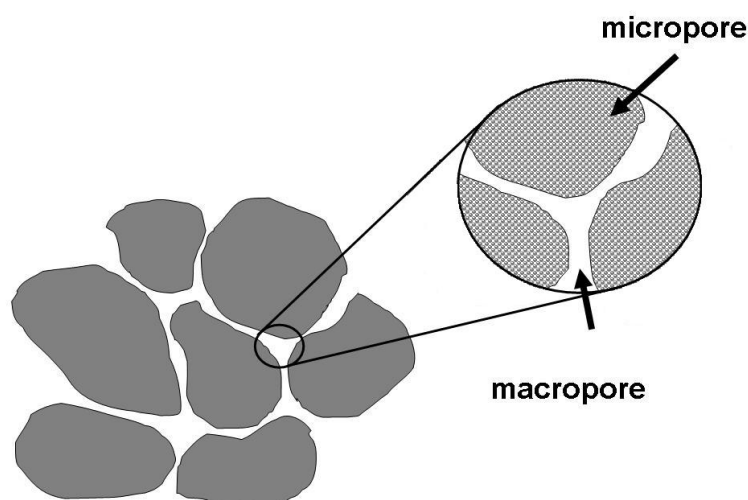


ภาพที่ 1 การดูดซับระหว่างดินกับน้ำด้วย adhesive force และ cohesive force

ที่มา: คณะอาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2510

ภาพที่ 1 แสดงการดูดซับน้ำไว้ในดินด้วยแรงที่สำคัญ 2 แรง คือ

1. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับของแข็ง (adhesive force) ซึ่งเป็นแรงดูดยึด (attraction) ระหว่างพื้นผิวของอนุภาคของดินกับโมเลกุลของน้ำ
2. แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของของเหลวด้วยกัน (cohesive force) ซึ่งเป็นแรงดูดยึดกันระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเอง



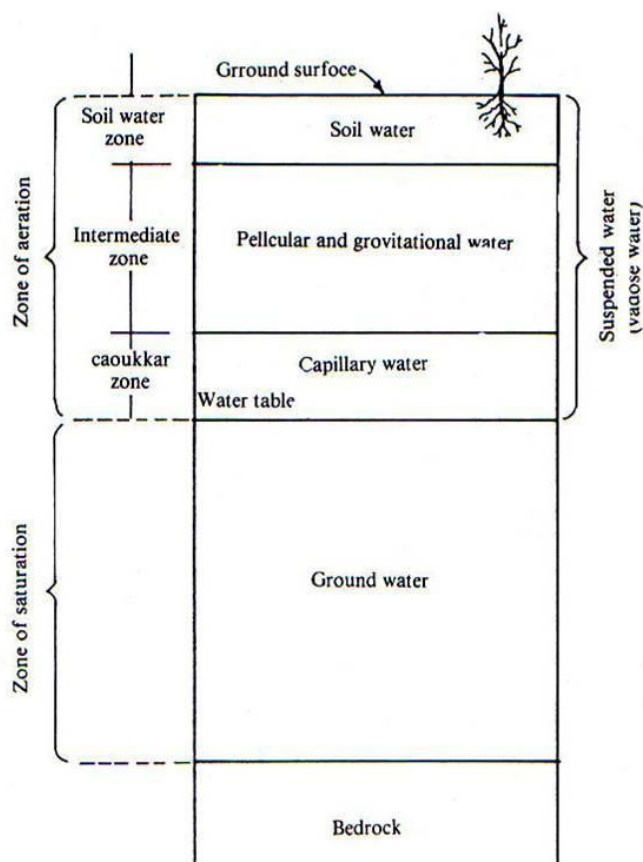
ภาพที่ 2 micropore และ macropore

ที่มา: คัดแปลงมาจาก Bowles (1970)

จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าแรงดูดยึดนี้จะช่วยให้น้ำมีอยู่เต็ม micropore ส่วน macropore นั้นถึงแม้จะไม่มีน้ำ แต่ที่ขอบของ pore ก็ยังคงมีเยื่อน้ำ (water film) ที่หนาเกาะอยู่และไม่ถูกระบายออก เนื่องจากแรงดูดยึดของ cohesive force และ adhesive force นี้ (คณะอาจารย์ในแผนกวิชาปฐพีวิทยา, 2510)

3. น้ำใต้ดิน (groundwater)

น้ำใต้ดิน หมายถึง น้ำที่ถูกกักเก็บอยู่ในช่องว่างของชั้นหินหรือชั้นดิน ซึ่งได้มาจากน้ำฝนหรือน้ำในแม่น้ำลำคลองที่ไหลซึมลงไปได้ดิน ระดับความลึกจากพื้นผิวดินไปยังแหล่งกักเก็บน้ำใต้ดินไม่แน่นอน บางแห่งก็อยู่ที่ระดับความลึกเพียง 6-8 เมตร บางแห่งก็ลึกมากกว่านี้ ในขณะที่มีการสูบหรือดึงน้ำขึ้นมา ระดับน้ำจะลดลงไปอยู่ในระดับหนึ่ง เมื่อปล่อยไว้สักครู่ น้ำก็คืนสู่ระดับเดิม น้ำใต้ดินถ้าแบ่งตามชั้นดินและชั้นหินจะได้เป็น 2 โซน ดังภาพที่ 3

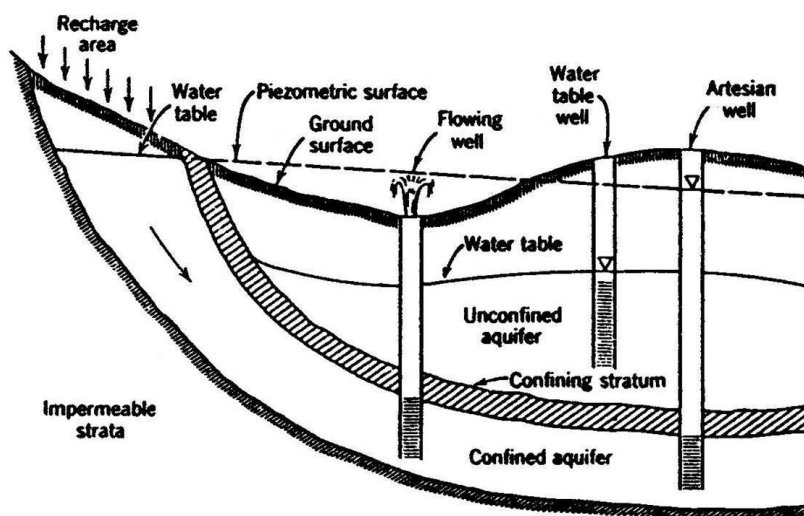


ภาพที่ 3 การแบ่งชั้นความชื้นใต้ผิวดินเหนือชั้นน้ำบาดาล

ที่มา: ฌลอง, อ้างต่อจาก Todd, 1959

3.1 โซนที่มีอากาศแทรก (zone of areation) หรือ โซนที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated zone) เป็น ส่วนของชั้นดินหรือชั้นหินที่มีน้ำเก็บกักอยู่และบางส่วนมีอากาศแทรก โดยทั่วไปเป็นชั้นน้ำที่ไม่มี ชั้นหินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ปิดกั้นไว้ทางด้านบน

ดินและหินที่สามารถให้น้ำซึมผ่านไปได้และเก็บน้ำไว้ เรียกว่า ชั้นหินอุ้มน้ำ (aquifer) แต่ สำหรับโซนที่ไม่อิ่มตัวมี aquifer ที่มีขอบเขตบนเป็น free surface (ความดันบรรยากาศ) เรียก aquifer นี้ว่าชั้นน้ำเปิดหรือชั้นอุ้มน้ำแบบไม่เก็บกัก (unconfined aquifer) ดังภาพที่ 4 น้ำใต้ดินใน โซนนี้จะถูกเรียกว่า น้ำอิสระ (vadose water, suspended water) ระดับของน้ำใต้ดินอยู่ตอนบนสุด ของส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งอาจสูงขึ้นหรือต่ำลงขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำใต้ดินที่ถูกเก็บกัก ถ้า อนุภาคของดินไม่สามารถดูดซับน้ำไว้ได้ น้ำอิสระก็จะไหลซึมลงสู่ระดับน้ำใต้ดินโดยแรงโน้มถ่วง



ภาพที่ 4 ลักษณะดินและชั้นน้ำใต้ดิน

ที่มา: วิชัย, 2529

3.1.1 โชนที่มีน้ำใต้พื้นดินอยู่ แบ่งเป็นชั้นย่อยๆ ออกได้ 3 ชั้น คือ

- ก. ชั้นความชื้นในดิน (soil moisture belt) เป็นชั้นที่อยู่ระดับบนสุดที่มีน้ำแทรกปนอยู่กับดิน รากของพืชส่วนมากอยู่ในระดับนี้
- ข. ชั้นกลาง (intermediate belt) เป็นชั้นที่อยู่ลึกกว่าระดับที่รากพืชยังลงไปถึง โพร่งช่องว่างมักจะถูกแทรกซึมด้วยน้ำ
- ค. ชั้นอิมัวเหินระดับน้ำใต้ดิน (capillary fringe) เป็นชั้นน้ำซึมที่อยู่ใกล้ระดับน้ำใต้ดินและมีน้ำแทรกเข้าอยู่ในรูพรุนเล็กๆ ของดินที่อยู่ในชั้นนี้ การที่บริเวณชั้นคาปิลลารียังมีน้ำแทรกอยู่ในช่องว่างของดิน เนื่องจากน้ำใต้ดินถูกดูดขึ้นตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินโดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับเม็ดดิน ซึ่งมีผลมาจากแรงตึงผิว (surface tension) ระหว่างน้ำและอากาศ น้ำอยู่ในสภาพที่ซึมเคลื่อนตัวตามรูช่องว่าง เล็กๆ ไปในทิศทางที่ตรงข้ามกับแรงดึงดูดของโลก ซึ่งเกิดเมื่อผิวของของแข็งแตะกับผิวของของเหลว ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างแรงดึงดูดที่มีต่ออนุภาค

3.1.2 บริเวณชั้นคาปิลลารีสามารถแบ่งได้เป็น 3 บริเวณ คือ

ก. บริเวณอิ่มตัวด้วยน้ำ (capillary saturation) บริเวณนี้จะติดอยู่กับระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งดินจะมีค่าปริมาณความชื้นสูงมาก และมีสภาพเหมือนอิ่มตัวด้วยน้ำ

ข. บริเวณอิ่มตัวด้วยน้ำบางส่วน (partial capillary saturation) บริเวณนี้จะอยู่เหนือบริเวณอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งดินในบริเวณนี้จะมีน้ำแทรกอยู่ในช่องว่างของเม็ดดินที่มีขนาดเล็ก ส่วนช่องว่างขนาดใหญ่จะมีอากาศบรรจุอยู่

ค. บริเวณที่มีน้ำแทรกน้อย (contact water) บริเวณนี้จะมีน้ำหุ้มรอบเม็ดดินแต่ไม่ได้อยู่ในช่องว่างของเม็ดดิน

3.2 โซนที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ (zone of saturation) อยู่ภายใต้ชั้นน้ำเปิดซึ่งเป็นโซนที่ไม่มีอากาศอยู่ มี aquifer ที่มีขอบเขตด้านบนเป็นดินที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ (aquiclude) ทำให้ความกดดันของของเหลวมากกว่า 1 บรรยากาศ น้ำที่ได้มาจากน้ำฝน น้ำที่ไหลตามแรงโน้มถ่วงจากโซนชั้นบน และน้ำที่มาจากหินหนืด (magmatic water) ที่อยู่ในระดับลึกเกิดจากการเย็นตัวตกผลึกของหินหนืด ในโซนที่อิ่มตัวด้วยน้ำมีน้ำใต้ผิวดินอยู่เพียงชั้นเดียวคือ น้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล

4. การไหลของน้ำใต้ดิน (movement of groundwater)

การไหลของน้ำใต้ดินจะอยู่ในลักษณะที่ต้องเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างต่างๆซึ่งตัวมันเองแทรกหรือถูกเก็บกักอยู่ จึงอยู่ในลักษณะของการไหลของน้ำผ่านวัตถุที่มีรูพรุน (flow through porous media) เมื่อระดับน้ำใต้ดินมีความลาดเท น้ำใต้ดินก็จะไหลไปตามความลาดเทนั้น ความลาดเทนี้เรียกว่า ลาดชลศาสตร์ (hydraulic gradient) และโดยปกติอัตราการไหลของน้ำใต้ดินจะช้ามาก แบ่งการไหลออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค คือ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ในลักษณะตามกันไปเป็นแผ่นหรือชั้นเรียบๆ ส่วนการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ในทิศทางไม่แน่นอน สามารถคำนวณได้จากกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) ดังสมการที่ (1)

$$V = -K \left(\frac{dH}{dX} \right) \text{ หรือ } Q = -KA \left(\frac{dH}{dX} \right) \quad (1)$$

Q	=	อัตราการไหล [L^3T^{-1}]
v	=	ความเร็วเฉลี่ยของการไหล [LT^{-1}]
A	=	พื้นที่หน้าตัด [L^2]
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (hydraulic conductivity) [LT^{-1}]
dH	=	ความแตกต่างระหว่างระดับน้ำ (hydraulic head) [L] = $h_2 - h_1$
dX	=	ระยะทางตามทิศทางการไหล [L] = $X_2 - X_1$
$\frac{dH}{dX}$	=	ค่าลาดชัน (hydraulic gradient), $\left(-\frac{dH}{dX}\right)$ มีเครื่องหมายลบ แสดงถึง ระยะทางตามทิศทางการไหลมากขึ้นพลังงานลดลง

พบว่า อัตราการไหลผ่านตัวกลางพรุน (Q) จะแปรผันโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัด (A) และค่าความแตกต่างระหว่างระดับน้ำ (head loss) ที่เข้าและออกจากระบบ (dH) แต่จะแปรผกผันกับระยะทางตามทิศทางการไหล (dX)

ความเร็วคาร์ซี (v) เป็นความเร็วเฉลี่ยของการไหล ดังสมการที่ (2)

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

ส่วนความเร็วจริง ๆ คือ ความเร็วของน้ำในช่องว่างจะเท่ากับ v_a (actual velocity) แสดงดังสมการที่ (3)

$$v_a = \frac{v}{n} \quad (3)$$

เมื่อ n คือ ความพรุนทั้งหมด (total porosity) ซึ่งหมายถึง จำนวนช่องว่างที่มีอยู่ในหินทั้งหมด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมดของหินนั้น น้ำใต้ดินเป็นน้ำที่ถูกกักเก็บหรือแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของหินในส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นขนาดของความพรุนก็จะเป็นตัวบอกถึงปริมาณของน้ำใต้ดินที่ถูกกักเก็บอยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำต่างๆ ตัวอย่างเช่น หินทรายก้อนหนึ่งมีความพรุน 20 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่าถ้าหินทรายก้อนนี้มีปริมาตร 100 ลบ.นิ้ว จะมีช่องว่างคิดเป็น 20 ลบ.นิ้ว

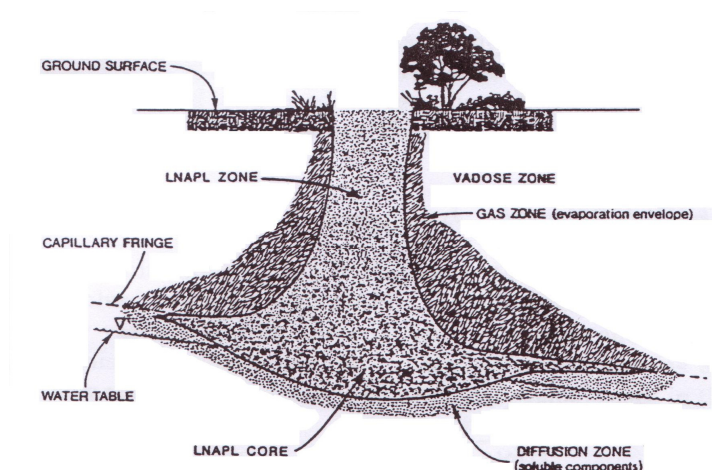
จากการที่น้ำใต้ดินไหลผ่านชั้นหินต่าง ๆ ด้วยความเร็วที่ขึ้นกับตัวแปรต่าง ๆ แล้ว ความซึมซาบได้หรือความสามารถในการอุ้มน้ำ (permeability) ก็มีผลต่อการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินอีกด้วย หมายถึงความสามารถของชั้นหินอุ้มน้ำที่จะยอมให้น้ำภายใต้ความกดดันไหลผ่านไปได้ ดังนั้นพวกที่มีความซึมได้ต่ำจึงเป็นชั้นหินที่อุ้มน้ำไม่ดี ค่าความซึมซาบได้ที่ใช้ในงานของน้ำใต้ดินส่วนมากคือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (hydraulic conductivity) (ฉลอง, 2538) เป็นค่าที่บ่งชี้ว่าน้ำไหลผ่านชั้นดินได้ง่ายหรือยาก ถ้าค่า hydraulic conductivity สูงจะมีความเร็วน้ำไหลผ่านชั้นใต้ดินมากด้วย ค่า hydraulic conductivity ของชั้นดินบางชนิด เช่น ของดินเหนียว ของทรายละเอียด ของทรายหยาบ ของกรวด จะมีค่าเท่ากับ $< 10^{-8}$ ม./วินาที, $10^{-5} - 10^{-4}$ ม./วินาที และ $> 10^{-2}$ ม./วินาที ตามลำดับ

5. การเคลื่อนที่ของ NAPL ในน้ำใต้ดิน

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

ปัจจัยในการเคลื่อนที่ของ NAPL ในน้ำใต้ดิน

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



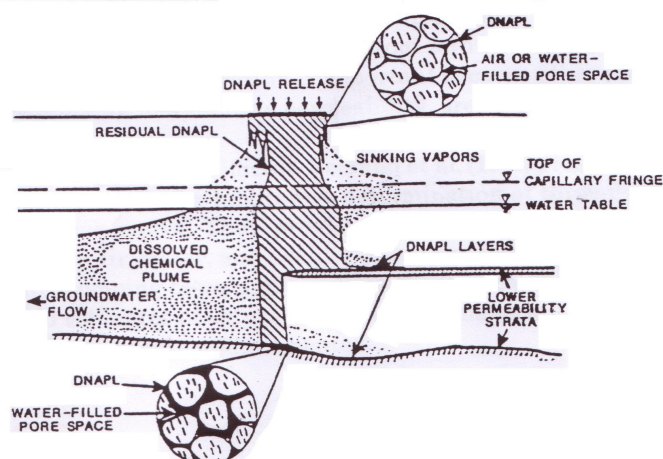
ภาพที่ 5 แผนภาพการแทรกซึมของ LNAPL ในน้ำใต้ดิน

ที่มา: Mercer and Cohen, 1990

จากภาพที่ 5 เป็นแผนภาพตัดขวางแสดงการกระจายตัวของสารเคมีอินทรีย์ในหลายสถานะ ซึ่งเป็นผลมาจากการรั่วไหลของ LNAPL เมื่อ LNAPL ไหลลงสู่พื้นผิวดินด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้ NAPL เคลื่อนตัวลงสู่ใต้ดินไปยัง vadose zone และมีลักษณะแยกตัวจากน้ำได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการเคลื่อนตัวของ NAPL ในแนวดิ่งประกอบกับการแพร่กระจายไปในแนวด้านข้างที่เป็นผลมาจากแรงดันคาпилลารี (capillary force) และช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีขนาดแตกต่างกัน

กระบวนการในการเคลื่อนที่ของ NAPL ไปสู่ vadose zone ทำให้มี NAPL คัดค้างอยู่ในช่องว่างของอนุภาคดิน ซึ่งการที่ NAPL มาเกาะติดอยู่นี้เป็นผลมาจากแรงดึงดูด นอกจากนี้การเคลื่อนย้ายของ NAPL ซึ่งเป็นของเหลวที่ไม่สามารถรวมกันกับน้ำได้อาจจะมีการระเหยในรูปของไออยู่รอบ NAPL ถ้าการรั่วไหลของ NAPL มีปริมาณมากพอ ท้ายที่สุด NAPL บางส่วนจะสามารถเข้าไปถึงใน unsaturated zone ได้ และ LNAPL ก็จะกระจายตัวไปในแนวด้านข้างขนานกับขอบของ capillary fringe และอาจจะจมลงไปตามระดับน้ำใต้ดินได้อีกด้วย

การกระจายตัวของ LNAPL ขึ้นกับ ชนิดของ LNAPL, น้ำ และความดันอากาศ รวมถึงการกระจายตัวของขนาดของช่องว่างในดิน ดังภาพที่ 5 เป็นชนิดของตัวกลางที่เหมือนกันที่ยอมให้ LNAPL ซึมผ่านได้ แต่ในตัวกลางที่ไม่เหมือนกัน การกระจายตัวของ LNAPL จะมีความซับซ้อนมากกว่านี้



ภาพที่ 6 แผนภาพการแทรกซึมของ DNAPL ในน้ำใต้ดิน

ที่มา: Mercer and Cohen, 1990

จากภาพที่ 6 แสดงการเคลื่อนตัวของ DNAPL โดยจะเคลื่อนตัวลงไปได้ น้ำและเคลื่อนย้ายภายใต้แรงดันและแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่ง DNAPL ที่พบมักจะกระจายตัวอยู่ในชั้นที่สามารถซึมผ่านได้หรือตามรอยแตกร้าว เมื่อมี DNAPL ในปริมาณที่มากพอ DNAPL จะมีการเคลื่อนย้ายลงไปที่ด้านล่างจนกระทั่งไปสัมผัสกับด้านบนของชั้นที่ไม่สามารถผ่านไปได้ จะถูกกั้นไว้และจะไหลต่อเนื่องไปภายใต้แรงดันและแรงโน้มถ่วงของโลก ดังที่ vadose zone มีปริมาณของ NAPL บางส่วนอยู่ในช่องว่างของอนุภาคดินอยู่ภายใน saturated zone ซึ่ง NAPL ที่ติดค้างอยู่นี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งของสารเคมีที่จะไหลไปตามน้ำใต้ดิน ขึ้นกับความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบอินทรีย์นั้น

ใน vadose zone การแทรกซึมของน้ำฝนลงมาถึงดินอาจจะละลายไอของสารอินทรีย์หรือ NAPL ที่เหลือติดค้างอยู่ในช่องว่างในดิน และทำให้เคลื่อนย้ายส่วนประกอบของสารอินทรีย์นั้นไปยังบริเวณ saturated zone ได้

6. ความสามารถในการละลายน้ำ (solubility)

การปนเปื้อนในน้ำใต้ดินสารปนเปื้อนจะเคลื่อนที่ไปกับน้ำใต้ดินด้วย คุณสมบัติที่ต่างกันของสารปนเปื้อน คือ ความสามารถในการละลาย ที่ทำให้เกิดการแทรกตัวอยู่ในดินและน้ำใต้ดิน

ต่างกัน หมายถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวถูกละลายต่อปริมาณตัวทำละลายในสารละลายอิ่มตัว ที่อุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นสูงสุดของสารเคมีที่สามารถละลายในน้ำบริสุทธิ์ได้ ที่อุณหภูมินั้น (Mercer and Cohen, 1990)

ในตัวทำละลายแต่ละชนิดจะมีสภาพขั้วของสารชนิดนั้น ๆ โดยโมเลกุลที่มีขั้วจะสามารถละลายสารประกอบไอออนิกและสารประกอบโควาเลนต์ที่มีขั้วได้ ส่วนโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะสามารถละลายสารประกอบโควาเลนต์ที่ไม่มีขั้วได้ สารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วจะไม่สามารถรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันได้ แต่จะแยกออกเป็นชั้น ๆ

ตารางที่ 1 ความสามารถในการละลายน้ำ (mg/L) ของ chlorinated solvent compounds ที่อุณหภูมิ 23 ถึง 25 °C

	Broholm and Feenstra (1995) (23-24 °C)	Horvath (1982) (25 °C)	Mackay and Shiu (1981) (25 °C)
ชนิดของสารประกอบ			
Chloroform	8700	7920	7295
Carbon Tetrachloride	780	793	1000
1,1,1-Trichloroethane	1250	1495	720
Trichloroethylene	1400	1100	1050

ที่มา: Pankow and Cherry, 1995

จากตารางที่ 1 แสดงค่าความสามารถในการละลายน้ำของ chlorinated solvent compounds ที่อุณหภูมิ 23 ถึง 25 °C ซึ่งได้จากการทดลองในงานวิจัยอื่น ๆ โดยที่สภาพการละลายขึ้นกับปัจจัยดังนี้

- 1) อุณหภูมิ
- 2) ตัวทำละลายร่วม (cosolvents)
- 3) ความเค็มหรือสภาวะเค็ม (salinity)
- 4) สารที่ละลาย (dissolved organic matter)

แม้ว่าสภาพการละลายของสารเคมีส่วนใหญ่ในน้ำจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่ทิศทางและขนาดของความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิกับสภาพการละลายยังขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างของสารเคมีที่คล้ายกันคือ ผลกระทบจากตัวทำละลายร่วม (สารประกอบอินทรีย์หลายตัว) ความสามารถในการละลายของสารนั้นขึ้นขึ้นกับการผสมจำเพาะ (specific mix) และความเข้มข้นของสารประกอบ (Mercer and Cohen, 1990)

Mercer and Cohen (1990) อ้างต่อจาก Banerjee (1984) and Groves (1988) ได้อธิบายถึงวิธีการคาดการณ์ความสามารถในการละลายของสารผสมในน้ำ ด้วยสมการ activity coefficient ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อมีความเค็มในน้ำมาก ความสามารถในการละลายน้ำของสารเคมีอินทรีย์จะลดลง

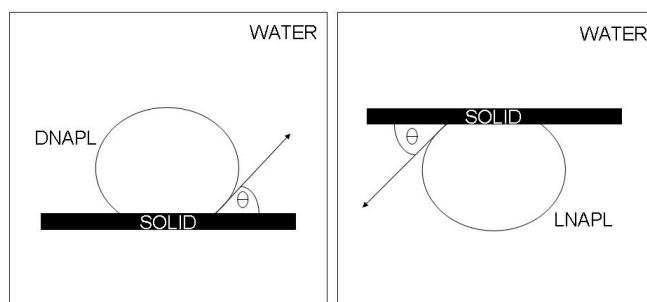
7. ของเหลวที่ผสมเข้ากันไม่ได้ (immiscible liquid)

LaGrega (2001) กล่าวถึงปัญหาของการคาดการณ์การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน จะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นถ้าสารปนเปื้อนนั้นเป็น NAPL ซึ่งของเหลวที่เป็นสารประกอบอินทรีย์นั้นแสดงคุณลักษณะเป็นของเหลวที่ไม่สามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำได้ สารอินทรีย์นี้จะมีสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก หรือใกล้เคียงกับสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ พบได้ในแหล่งน้ำใต้ดิน จะเห็นเป็นชั้นแยกตัวจากน้ำ โดยที่มีความหนาแน่นและความหนืดต่างจากน้ำ เช่น DNAPL ที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ และ LNAPL ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ

8. ความสามารถเปียกได้ (wettability)

ปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมลักษณะการแทรกตัวของสารปนเปื้อนคือ ความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวหมายถึง แนวโน้มที่ของเหลวชนิดหนึ่งจะแผ่บนหรืออยู่ใกล้พื้นผิวของแข็งเมื่อมีของเหลวอีกชนิดหนึ่งอยู่ด้วย

โดยสามารถบอก wettability ในเชิงปริมาณได้ด้วยการวัดมุมสัมผัสของของเหลวที่แผ่บนพื้นผิวของแข็ง ดังภาพที่ 7 แสดงมุมสัมผัสระหว่าง NAPL ที่แผ่บนของแข็ง เมื่อมีน้ำล้อมรอบอยู่ด้วย



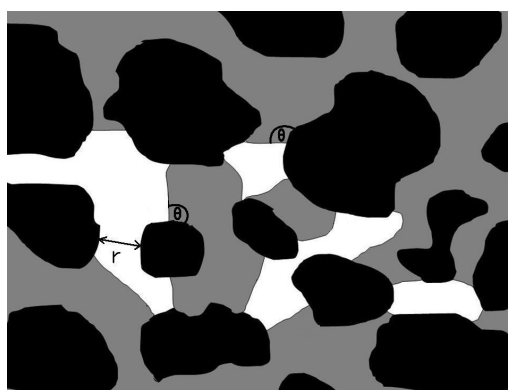
ภาพที่ 7 มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

มุมสัมผัสสัมพันธ์กับความดันคาปิลลารี (capillary pressure, P_c , N/m^2) ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะการปนเปื้อนของ NAPL โดยความดันคาปิลลารีสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4) และสมการลาปลาซ (5)

$$P_c = P_N - P_w \quad (4)$$

$$P_c = \frac{(2\sigma_{NW} \cos \theta)}{r} \quad (5)$$

- P_N = ความดัน NAPL
 P_w = ความดันน้ำ
 r = รัศมีของช่องว่างที่มีน้ำอยู่ และ NAPL ต้องแทรกผ่าน (เมตร)



ภาพที่ 8 การแทรกตัวของ NAPL ระหว่างเม็ดดินและน้ำ

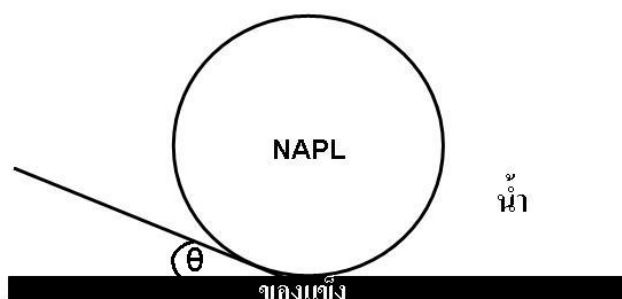
ที่มา: Chomsurin, 2003

จากภาพที่ 8 แสดงลักษณะการปนเปื้อนของ NAPL ในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ มี NAPL (สีขาว) อยู่ระหว่างช่องว่างดิน (สีดำ) ล้อมรอบด้วยน้ำ (สีเทา)

ภายใต้ผิวของเหลวจะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เท่ากันทุกทิศทางแต่บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับของแข็งหรือของไหลอื่น ๆ โมเลกุลของของเหลวจะได้รับแรงภายในซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวด้วยกัน ไม่เท่ากับแรงภายนอกซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับโมเลกุลของของแข็งหรือของไหลอื่น ๆ ของเหลวส่วนมากจะยึดเกาะอยู่กับของแข็ง แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับของแข็ง (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 9
- 2) เปียกผสมหรือ intermediate wet, $65^\circ < \theta < 105^\circ$
- 3) เปียกน้ำมันหรือ strongly oil-wet, $\theta > 105^\circ$ ดังภาพที่ 10

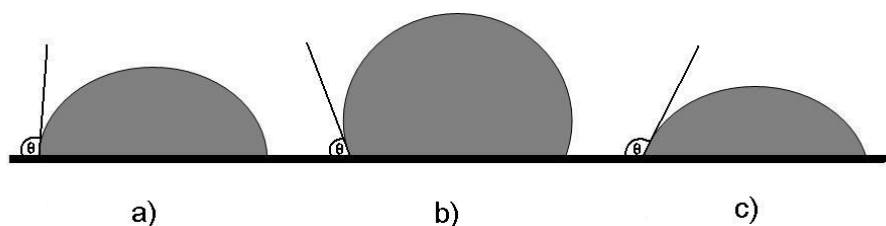


ภาพที่ 9 มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งที่เป็น strongly water-wet ล้อมรอบด้วยน้ำ



ภาพที่ 10 มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งที่เป็น strongly oil-wet ล้อมรอบด้วยน้ำ

อิทธิพลของมุมสัมผัสแสดงในภาพที่ 11 เมื่อหยดของเหลวที่อยู่บนผิวระนาบแนวนอน (horizontal) มุมสัมผัสจะเกิดขึ้นในระนาบที่อยู่ระหว่าง 3 เฟส เมื่อเพิ่มปริมาตรของเหลวลงไปให้มากขึ้น ลักษณะของหยดที่เกิดขึ้นจะมีความสูงเพิ่มขึ้น แต่ฐานยังมีความยาวเท่าเดิม ดังภาพที่ 11 b) จึงทำให้มุมสัมผัสมีค่าน้อยลง หลังจากนั้นลดปริมาตรของเหลวในหยดเดิม ภาพที่ 11 a) โดยที่ความยาวของฐานยังเท่าเดิม แต่หยดของเหลวแบนลง ดังนั้นมุมสัมผัสจึงมากกว่าหยดเดิม ดังภาพที่ 11 c)

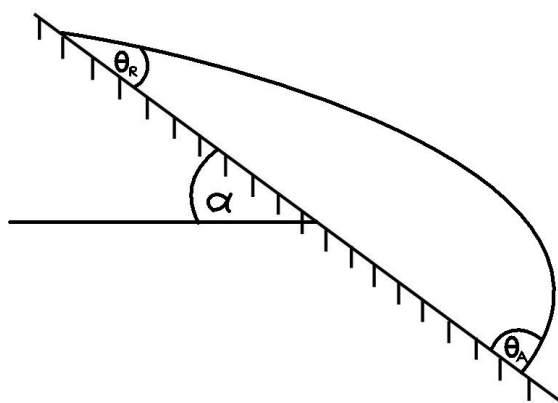


ภาพที่ 11 อิทธิพลของมุมสัมผัส

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 12



ภาพที่ 12 หยดของเหลวที่เอียงจากระนาบด้วยมุม α

ที่มา: Bikerman, 1970

จากการทดลองวัดมุมสัมผัสในงานวิจัยอื่น ๆ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 มุมสัมผัสของน้ำบนของแข็ง ซึ่งมีของเหลวอีกชนิดอยู่ด้วย

ระบบ	มุมสัมผัส
ควอตซ์-น้ำ-dodecane	0° advancing และ receding
แก้ว-น้ำ-mercury	41° receding
ไมกา-น้ำ-benzene	0° receding
ทัลก์-น้ำ-benzene	135° receding
ทัลก์-น้ำ-benzyl alcohol	122° receding
ทัลก์-น้ำ-ethylene dibromide	145° receding

ที่มา: Bikerman, 1970

ตารางที่ 3 ผลการทดลองมุมสัมผัสของ DNAPL บนพื้นผิวต่างชนิดกัน

ของเหลวที่ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	พื้นผิว	ตัวกลาง	มุมสัมผัส (°)
tetrachloroethene	ดินเหนียว	APL	23-48
tetrachloroethene	ดินเหนียว	อากาศ	153-168
tetrachloroethene	ทราย ottawa ที่ละเอียดไปจนถึงหยาบ	น้ำ	33-45
tetrachloroethene	Lockport dolomite	น้ำ	16-21
tetrachloroethene	Lockport dolomite	อากาศ	171
1,2,4- trichlorobenzene	ดินเหนียว	APL	23-38
1,2,4- trichlorobenzene	ดินเหนียว	อากาศ	153

APL: aqueous phase liquids (water containing dissolved chemicals)

ที่มา: Mercer and Cohen, 1990 อ้างต่อจาก Arthur D. Little, Inc, 1981

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การวัดมุมสัมผัสโดยตรงจากภาพถ่ายดิจิทัล ซึ่ง Bikerman (1970) กล่าวว่า การวัดมุมสัมผัสโดยตรงนิยมใช้กันมากกว่าการวัดด้วยวิธีอื่น ๆ เนื่องจากทำให้มุมสัมผัสที่วัดได้ตรงกับค่าที่เป็นจริง ซึ่งการวัดมุมสัมผัสโดยตรงจะเป็นการใช้สายตาหรือการส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ (microscope) และวัดมุมสัมผัสด้วยโปรแทรกเตอร์ หรือการใช้มาตรมุม (goniometer) เป็นเครื่องมือในการวัดมุมสัมผัส ซึ่งสามารถบันทึกภาพของมุมสัมผัสและนำไปวัดมุมสัมผัสในภาพที่ขยายได้

9. กล้องดิจิทัล (digital camera)

กล้องดิจิทัลเป็นกล้องถ่ายรูปที่ไม่ต้องใช้ฟิล์ม ภาพที่ถ่ายได้จะถูกบันทึกไว้ในรูปแบบดิจิทัล โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในกล้อง อยู่ในรูปแบบของไฟล์ภาพซึ่งสามารถส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปพิมพ์ออกมาเป็นภาพ หรือตกแต่งภาพด้วยโปรแกรมต่าง ๆ เช่น โปรแกรม Adobe Photoshop

9.1 กล้องดิจิทัลมี 2 แบบ คือ

9.1.1 กล้องดิจิทัล compact คือกล้องชนิดพกพาที่ไม่สามารถเปลี่ยนเลนส์ได้ เป็นกล้องที่ออกแบบให้ใช้งานได้ง่าย ไม่มีความซับซ้อน เป็นระบบอัตโนมัติหรือมีฟังก์ชันช่วยเหลือ

9.1.2 กล้องดิจิทัล SLR (single lens reflex) เป็นกล้องดิจิทัลที่สามารถถอดเปลี่ยนเลนส์ได้ และเป็นกล้องที่ผู้ใช้จะต้องมีความรู้ในการถ่ายภาพดีพอสมควร เนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่ซับซ้อนมากกว่ากล้องดิจิทัล compact อีกทั้งยังให้ผู้ใช้สามารถปรับตั้งค่าต่าง ๆ เองได้ตามต้องการ รูปร่างของกล้องค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากขนาดของอุปกรณ์รับรู้ภาพใหญ่กว่ากล้องดิจิทัล compact และยังต้องรองรับเลนส์และฟังก์ชันการทำงานที่ซับซ้อนด้วย

9.2 อุปกรณ์รับรู้ภาพ (image sensor) เป็นส่วนสำคัญของกล้องดิจิทัลและทำให้กล้องดิจิทัลมีความแตกต่างจากกล้องถ่ายรูปรุ่นก่อน ซึ่งทำหน้าที่เหมือนฟิล์ม อุปกรณ์รับรู้ภาพนี้เป็นไมโครชิพที่มีความไวต่อแสง โดยจะแปลงแสงที่รับมาให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ทำให้ได้ข้อมูลในรูปแบบไฟล์ดิจิทัล บนพื้นผิวของอุปกรณ์รับรู้ภาพจะถูกแบ่งย่อยเป็นส่วนเล็ก ๆ ที่เรียกว่า จุดภาพ (pixel) ถ้าจำนวน pixel มาก ภาพก็จะมีความละเอียดมากแต่ก็จะทำให้ปริมาณข้อมูลของภาพมากขึ้นด้วย

จำนวน pixel ของภาพสามารถคำนวณได้จากการนำจำนวน pixel ตามแนวตั้งคูณด้วยจำนวน pixel ตามแนวนอน เช่น ภาพขนาด 3008×2000 pixels นั่นคือความละเอียด (resolution) ประมาณ 6 ล้าน pixels

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

9.3 ทางยาวโฟกัส (focal length) เลนส์ถ่ายภาพจะมีตัวเลขบอกทางยาวโฟกัส เช่น 14 มม., 28 มม., 35 มม. (มิลลิเมตร) เป็นตัวเลขที่บอกถึงมุมรับภาพที่ตกกระทบบนฟิล์ม เลนส์ที่มีตัวเลขทางยาวโฟกัสน้อยก็จะมีมุมรับภาพที่กว้าง และเลนส์ที่มีตัวเลขทางยาวโฟกัสมากก็จะมีมุมรับภาพที่แคบลง โดยทางยาวโฟกัสของเลนส์จะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ (สุกสิทธิ์, 2546)

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

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

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

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

9.4 ISO (international organization for standardization)

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

10. สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds, VOCs)

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทหนึ่งที่ระเหยเป็นไอได้ง่าย ที่อุณหภูมิและความดันปกติ โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน (C) และ ไฮโดรเจน (H) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งอาจมีธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบร่วมด้วย เช่น ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) มีความดันไอ (vapor pressure) สูง ทำให้ระเหยง่าย โดยทั่วไปมีมวลโมเลกุลต่ำ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า 12 อะตอม

Hydrocarbons แยกออกได้เป็นสารชนิดแอโรแมติก (aromatic) และสารชนิดแอลิเฟติก (aliphatic) โดยสารแอโรแมติก เป็นพวกโครงสร้างเคมีวงแหวน วงเดียวหรือหลาย ๆ วง ได้แก่ benzene, phenol, pentalene ส่วนสาร aliphatic เป็นพวกโครงสร้างเคมีโซ่ยาวหรือสั้น ได้แก่ methyl, propane, ethylene พวกโครงสร้างวงแหวนจะถูกกำจัดยากกว่าพวกโครงสร้างโซ่ ปิโตรเลียมก็จัดเป็นสารพวก hydrocarbons ผสมกับสารอินทรีย์ของไนโตรเจน ซัลเฟอร์และออกซิเจน มีได้ทั้งรูปของแก๊ส ของเหลว และของแข็ง เช่น แก๊สหุงต้ม น้ำมันรถ ขางมะตอย เป็นต้น

นอกจากนี้การใช้สารเคมีปราบศัตรูพืช (pesticides) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ สารจำพวก chlorinated hydrocarbon ได้แก่ DDT, 2,4,-D organophosphates, carbamates ตามชื่อเรียก สารประเภทนี้มีลักษณะเฉพาะตัวคือ มี คลอรีน (Cl) อะตอมเข้าแทนที่ไฮโดรเจน (H) อะตอม ในสารอินทรีย์นั้น โดยทั่วไปจะมีคลอรีนมากกว่าหนึ่งอะตอมในโมเลกุล สารเหล่านี้สามารถละลายน้ำได้น้อยมากจนถือว่าไม่ละลายน้ำเลยก็ได้ แต่ละลายได้ดีในน้ำมัน ไขมัน และตัวทำละลายอินทรีย์อื่น ๆ เช่น ไฮโดรคาร์บอน และจะมีความเสถียรมาก คือไม่สลายตัวได้ง่ายหรือมีความคงทนสูง

(persistence) สามารถอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน เป็นสาเหตุหนึ่งที่สารประเภทนี้ก่อให้เกิดปัญหาสถานะแวดล้อมเป็นพิษ

10.1) DNAPL (dense nonaqueous phase liquid)

DNAPL สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นของเหลวชนิดที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ หรือน้ำหนักกว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อสัมผัสกับน้ำจะมีลักษณะจมอยู่ใต้น้ำ เช่น chlorinated solvent โดยงานวิจัยนี้เลือก TCE เป็นตัวแทนของ DNAPL เพื่อศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิว ซึ่งแสดงรายละเอียดของ TCE ดังตารางที่ 4

10.2) LNAPL (light nonaqueous phase liquids)

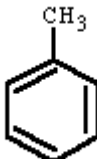
LNAPL เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งแยกตัวออกจากน้ำ เป็นของเหลวที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ หรือเบากว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อสัมผัสกับน้ำจะมีลักษณะลอยอยู่บนน้ำ ซึ่งเป็นผลผลิตปิโตรเลียมที่ได้จากการกลั่นที่อุณหภูมิต่างๆ จะได้น้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิด โดยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีมากมายหลายประเภทตามลักษณะของสูตรทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุล โดยงานวิจัยนี้เลือก Toluene เป็นตัวแทนของ LNAPL เพื่อศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิว ซึ่งรายละเอียดของ Toluene แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 Trichloroethylene (TCE)

ประเด็น	รายละเอียด
ชื่ออื่น	Ethylene trichloride, 1,1,2-trichloroethene
ข้อมูลเกี่ยวกับอันตราย	อาจก่อให้เกิดผลเสียแก่ร่างกาย เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ อาจมีผลเสียระยะยาวต่อสถานะแวดล้อมในน้ำ
ความเสถียรและความไวต่อปฏิกิริยา	สถานะที่ต้องหลีกเลี่ยง: การให้ความร้อนสูง สารที่ต้องหลีกเลี่ยง: โลหะอัลคาไล, โลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ, โลหะ ในสภาพที่เป็นผง, ไฮดรอกไซด์ของโลหะอัลคาไล, เอมีนของโลหะอัลคาไล, สารประกอบไฮโดรเจนกึ่งโลหะ, กรดเปอร์คลอริก, ออกซิเจน, ไฮดรอกไซด์ของโลหะอัลคาไล, ไนโตรเจนออกไซด์, โลหะเบา ผลิตภัณฑ์จากการสลายตัว เมื่อเกิดเพลิงไหม้: กรดไฮโดรคลอริก, ฟอสจีน, คลอรีน ข้อมูลเพิ่มเติม: ไวต่อความร้อน, การสลายตัว วัสดุที่ไม่เหมาะสม: พลาสติกชนิดต่างๆ สารเคมีในสภาพที่เป็นไอระเหยหรือแก๊ส เมื่อผสมกับอากาศ ก่อให้เกิดการระเบิดได้
ข้อมูลทางพิษวิทยา	พิษเฉียบพลัน: LD50 (oral, rat): 5650 mg/kg เมื่อสูดดม: ก่อให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อเมือก, ไอ และ หายใจลำบาก

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ

ตารางที่ 5 Toluene

ประเด็น	รายละเอียด
ชื่อเรียกอื่น	methylbenzene; toluol; phenylmethane; methacide
สูตรโมเลกุล	C ₇ H ₈
สูตรโครงสร้าง	
น้ำหนักโมเลกุล	92.13 g/mol
คุณสมบัติ	เป็นของเหลวไม่มีสี ติดไฟง่าย มีกลิ่นคล้าย benzene
การใช้ที่ผิดกฎหมาย	ใช้เป็นตัวทำละลายในการผลิต amphetamine, cocaine, methaqualone, mecloqualone, phencyclidine, psilocin
การใช้ที่ถูกกฎหมาย	ใช้เป็นตัวทำละลายในภาคอุตสาหกรรม ผลิต วัตถุระเบิด สีย้อม สารเคลือบ ใช้ผสมน้ำมัน เชื้อเพลิง ฯลฯ

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ

11. การเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อน (contaminant transport)

การเคลื่อนที่และการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินเกิดขึ้นได้ด้วยกลไกหรือกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

11.1 กระบวนการทางกายภาพ

1) การพา (advection) คือการที่สารละลายที่ปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินที่ไม่ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลายเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน ซึ่งการพาจะขึ้นกับความเร็วของน้ำใต้ดิน

2) การแพร่ (diffusion) คือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การเคลื่อนที่จะหยุดเมื่อโมเลกุลของสารแพร่เท่ากัน

3) การกระจาย (dispersion) คือการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดไปยังแหล่งอื่นๆ ที่อยู่นอกเส้นทางการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน หรืออาจเรียกว่า hydrodynamic dispersion

11.2 กระบวนการทางเคมี เป็นการทำปฏิกิริยาของสารเคมีต่าง ๆ ในน้ำใต้ดิน เช่น การตกตะกอนของสาร การละลาย เป็นต้น

11.3 กระบวนการทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายโดยจุลชีพ

12. แหล่งในการแพร่กระจายที่เป็นไปได้

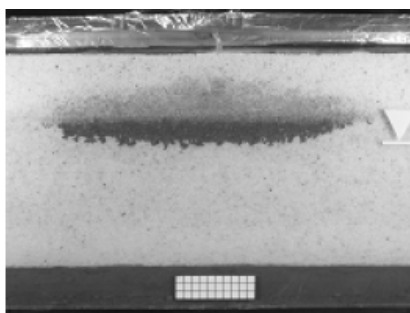
การขนส่งระหว่างโรงงานผลิตต่าง ๆ หรือระหว่างสถานที่ของผู้ผลิตและลูกค้า เมื่อมีวิธีการดำเนินการนั้นต่ำกว่ามาตรฐาน เป็นที่น่าพอใจว่าสิ่งนี้นำไปสู่การแพร่กระจาย

การขนส่งในโรงงานซึ่งประกอบด้วยการขนส่งทั้งหมดในบริเวณที่ผลิต รวมทั้งการเคลื่อนย้ายสารจากกระบวนการหนึ่งหรือภาชนะที่เกิดปฏิกิริยาไปยังหน่วยหรือการดำเนินการขั้นต่อไปในเครื่องปฏิกรณ์อื่น ๆ การจัดการปัญหาในลักษณะนี้ประกอบด้วยแหล่งมลภาวะที่สำคัญ การป้องกันนั้นยากเพราะว่าการสูญเสียแต่ละประเภทย่อย

13. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรรณรัฐ (2549) ได้ศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของ LNAPL ในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีความไม่สม่ำเสมอ (heterogeneous) ทางโครงสร้าง ซึ่ง LNAPL ที่ทำการศึกษาคือ BTEX เป็นสารประกอบของน้ำมันเบนซิน 91 โดยการทดลองเป็นการจำลองการรั่วของถังเก็บน้ำมันใต้ดิน

ด้วยวิธีการวิเคราะห์จากภาพดิจิทัล โดยบันทึกภาพลักษณะการเคลื่อนที่และการถ่ายเทมวลของ น้ำมันเชื้อเพลิงด้วยกล้องดิจิทัลยี่ห้อ Casio รุ่น EX-Z40 4 mega pixels $\times$ 3 zoom ที่มีความคมชัดสูง ดังแสดงในภาพที่ 13



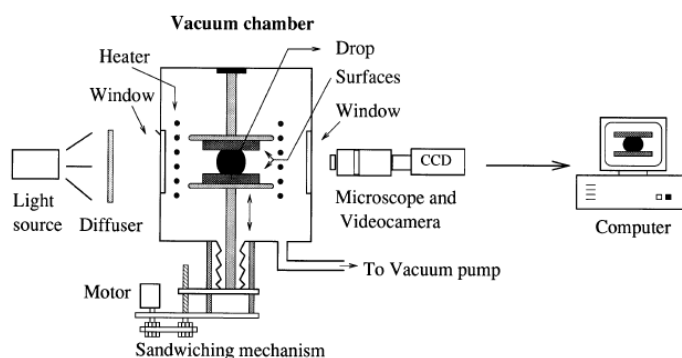
ภาพที่ 13 LNAPL ที่รวมตัวมีลักษณะคล้ายแอ่งน้ำหรือ plume น้ำมัน ซึ่งบันทึกจากภาพถ่ายดิจิทัล

ที่มา: วรรณัฐ, 2549

ซึ่งในการทดลองมีการถ่ายภาพของการเคลื่อนตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงในระยะทางในแนวตั้งและแนวนอน จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการประมวลผล โดยใช้โปรแกรม Matlab v.7 เพื่อหาค่าเชิงปริมาณ

Nakamura *et al.* (2005) สร้างแผ่น SiO_2 กับแผ่น TiO_2 ยึดติดกันไว้ มีผิว 2 ด้านคือ ด้าน SiO_2 ด้านบน และ TiO_2 ด้านล่าง เป็นชั้นเชื่อมคู่ (double layer) ซึ่ง SiO_2 มีคุณสมบัติเป็น hydrophilic เนื่องจากความเสถียรของกลุ่ม Si-OH ในช่องว่างอนุภาคของ SiO_2 โดยมีมุมสัมผัสของน้ำกับ SiO_2 เป็นศูนย์องศา และ TiO_2 เป็นตัวเร่งในการฉายแสง (photo-catalytic) แม้ว่าผิวของ SiO_2 จะมีคุณสมบัติเป็นพื้นผิวที่ชอบน้ำอย่างดี (very good hydrophilicity) แต่หลังจากหยดน้ำมันลงบนผิวของ SiO_2 แล้ว ผิวของ SiO_2 สามารถเปลี่ยนไปจากผิวที่ชอบน้ำได้ และสามารถทำให้ผิวของ SiO_2 กลับมาเป็น hydrophilic ได้ดังเดิมด้วยการฉายแสง UV ซึ่งต้องมี TiO_2 เป็น photo-catalytic

Amirfazli *et al.* (1998) วัดมุมสัมผัสด้วยวิธีการหยดของเหลวแบบ sandwich (sandwich drop method) แสดงดังภาพที่ 14



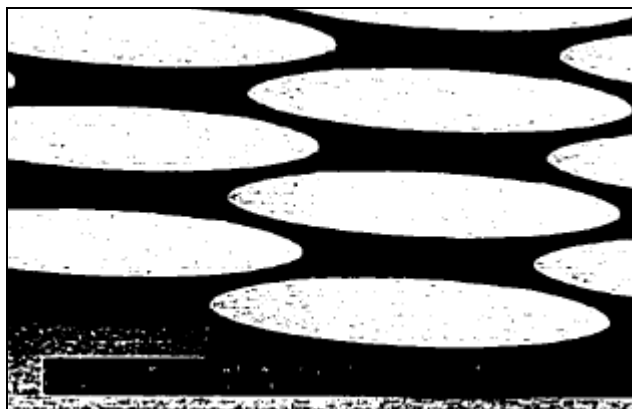
ภาพที่ 14 การจัดวางการทดลองวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีการหยดของเหลวแบบ sandwich

ที่มา: Amirfazli *et al.*, 1998

มุมสัมผัสที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน ± 2 องศา โดยวัดมุมสัมผัสของดีบุก (Sn) ซึ่งเป็นของเหลว บนพื้นผิวซิลิกา (SiO_2) ภายใต้ความดันสุญญากาศ โดยมีแผ่น (plate) เป็นพื้นผิวซิลิกา 2 แผ่นคือบนและล่าง หยดของเหลว Sn ลงไปบน plate ล่าง แล้วปรับความดันให้เป็น 10^{-5} Pa ปรับอุณหภูมิเป็น 1173 องศาเซลเซียส จากนั้น plate ด้านล่างจะขยับขึ้นสู่ด้านบนอย่างช้า ๆ ทำให้หยดของ Sn ไปชนกับ plate ด้านบน เกิดเป็นเหมือนสะพานเชื่อมระหว่าง plate ที่ขยับขึ้น มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นแบบ advancing contact angle จากนั้นบันทึกภาพด้วยกล้องวิดีโอ (videocamera) แบบ CCD ส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ รูปทรงของหยด Sn ที่ติดอยู่ระหว่าง plate จะถูกประมวลผลเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ความยาวของหยด Sn (contact diameter) บน plate ทั้งสองด้าน และมุมสัมผัสทั้ง 4 มุม คือมุมด้านซ้ายและขวาของทั้งสอง plate

Mercer (1990) ศึกษาทบทวนเกี่ยวกับของเหลวที่ผสมเข้ากันไม่ได้ (immiscible fluid) ในใต้ดิน ซึ่งพบว่าไม่กี่ปีมานี้ มีการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับสถานที่กำจัดขยะอันตราย ที่พบบ่อยคือมี immiscible fluid เกิดขึ้นอยู่ใต้พื้นดิน นั่นคือ NAPL ซึ่งมีพฤติกรรมต่างไปจากสารละลายอื่น ๆ ที่ละลายอยู่ใต้พื้นดิน จะขึ้นกับคุณสมบัติของของเหลว เช่น แรงตึงผิว ความหนืด และความหนาแน่น นอกจากนั้นการถ่ายเทมวลสารจะทำให้เกิดการถ่ายเทไอของสารในชั้น vadose zone รวมถึงการเคลื่อนที่ของตัวทำละลายด้วย

Chomsurin (2003) ศึกษาการละลายของ NAPL ในโครงข่ายช่องว่างอนุภาคเล็ก ๆ ของดิน แสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แบบจำลองโครงข่ายช่องว่างอนุภาคของดินซึ่งมีขนาดเล็กมาก ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

โดยใช้แผ่นซิลิกอนแทนอนุภาคของดิน และ NAPL ซึมซับด้วย hydrophobic fluorescent dye ซึ่งจะเกาะติดอยู่ที่ช่องว่างของอนุภาคในแผ่นซิลิกอน ซึ่งจะถูกกำจัด NAPL นี้ด้วยน้ำที่ซึมซับด้วย hydrophilic fluorescent dye บันทึกภาพของ NAPL ที่เกาะติดในอนุภาคของซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์ และหาค่าพื้นที่ผิว (surface area) ความยาวเส้นรอบวงของหยด NAPL โดยการวิเคราะห์จากภาพถ่ายดิจิทัล

Lee (2004) ศึกษาการละลายร่วมกันของ NAPL ในน้ำ โดยใช้ thermodynamic model คาดการณ์พฤติกรรมของการแยกตัวของ NAPL 2 ชนิดที่ละลายร่วมกันในน้ำในสภาวะสมดุล คำนวณ activity coefficient ด้วยวิธีการ UNIFAC (universal quasichemical functional group activity coefficient) ทำการจัดประเภทของ NAPL ชนิดที่มีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม ละลายร่วมกันเป็นคู่ และเปรียบเทียบระหว่าง แผนภาพที่ได้จากการคาดการณ์ของ UNIFAC กับแผนภาพที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยอื่นที่มีการจัดพิมพ์ไว้แล้ว ผลการทดลองพบว่า UNIFAC model เป็นวิธีการสำหรับคาดการณ์การละลายร่วมกันของ NAPL ในน้ำที่สภาวะสมดุล ดังนั้นจึงสามารถใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนได้ โดยใช้ UNIFAC ประเมินความสามารถในการละลายและการเคลื่อนที่ของ NAPL ในน้ำ อธิบายถึงพฤติกรรมของการแบ่งแยกตัวในการละลายร่วมกัน พิจารณาจากการเปลี่ยนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของระบบที่ประกอบด้วย NAPL และน้ำ แรงดึงดูดระหว่าง 2 phases ที่เปลี่ยนไป ประเมินจากการใช้ความสัมพันธ์ที่มีอยู่แล้ว ทำการทดลองหาความหนืดของของผสม ซึ่ง

สารที่เลือกใช้ในการทดลองคือ ethanol, toluene และน้ำ และจากการทดลองหาความหนืดพบว่าความหนืดเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีปริมาณสารที่ละลายร่วมกันมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่อง gas chromatography (GC) ของ Shimadzu รุ่น GC-14B ที่ใช้ flame ionization detector (FID) ติดตั้งคอลัมน์ SUS packed column (GC-8A) 3 mm ID × 2 m Unisole F-200 30/60 โดยตั้งอุณหภูมิดังนี้

Injector 140 องศาเซลเซียส เพื่อให้ TCE และ Toluene กลายเป็นไอได้โดยสมบูรณ์

Column 110 องศาเซลเซียส เพื่อให้ TCE และ Toluene ถูกหน่วงโดย column ทำให้ TCE และ Toluene มีเวลาอยู่ในคอลัมน์มากขึ้น

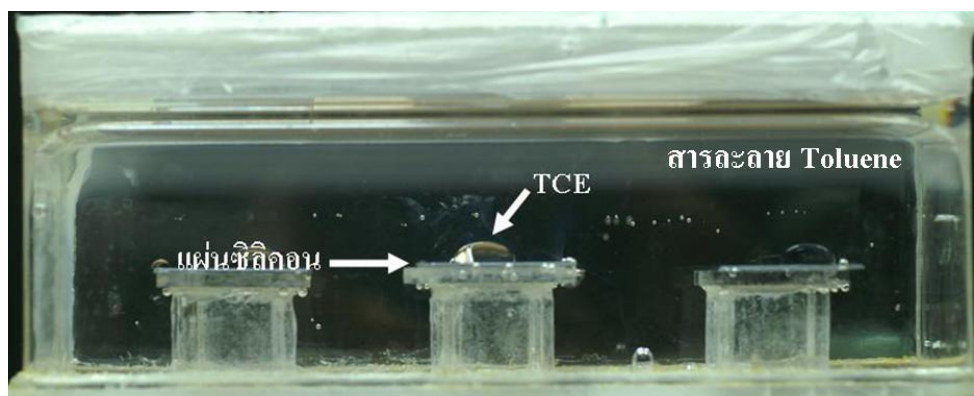
Detector 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้ TCE และ Toluene ถูกเผาไหม้โดยสมบูรณ์และไม่ให้ TCE และ Toluene เกิดการควบแน่นที่ detector และตั้งอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 30 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งจะทำให้ TCE และ Toluene ออกมาที่เวลาประมาณ 1.5 นาที และ 2.1 นาที (retention time) ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. อุปกรณ์เก็บตัวอย่างเพื่อวัดปริมาณ TCE และ Toluene สำหรับใช้กับเครื่อง GC ชนิด เข็ม SPME ของ SUPELCO ประกอบด้วย solid phase micro-extraction holder และ SPME fiber assembly 100 µm polydimethylsiloxane coating

3. ขวดแก้วใส (vial) พร้อมฝาเกลียวปิด และเคลือบด้วยแผ่น PTFE ขนาด 40 mL ของ Cole-Palmer instruments เพื่อเก็บตัวอย่างสารละลายที่เตรียมไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น TCE และ Toluene ในน้ำ (mg/L)

4. เข็มฉีดยา gas tight syringe ของ Hamilton รุ่น 1750 TLL 500 µL SYR REV M

5. เซลล์วัดมุมสัมผัส (contact angle cell) ทำด้วยพลาสติกอะคริลิก รูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด $5 \times 13 \times 5$ เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 เซลล์วัดมุมสัมผัสทำด้วยพลาสติกอะคริลิก ภายในบรรจุสารละลาย Toluene วัดมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน

คุณสมบัติของแผ่นซิลิคอนที่ใช้ในการทดลองซึ่งแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณสมบัติเฉพาะของแผ่นซิลิคอน

ประเด็น	รายละเอียด
Wafer lot no.	QS16201
Grade	Test wafer
	Cz growth method
Orientation (crystal)	100
Type/Dopant	p/Boron
Thickness (micron)	625 ± 25
TTV (micron)	< 10
Wrap (micron)	< 50
Surface finish	Mech-Chem Polished
Backside finish	Bright etched
Carbon content	< 0.5 ppm

6. แผ่นซิลิคอน ขนาด 2.5×2.5 เซนติเมตร และแผ่นควอตซ์ ขนาด 2.2×2.2 เซนติเมตร

แผ่นซิลิคอนที่นำมาใช้ในการทดลองได้รับจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 6

แผ่นควอตซ์ซื้อจากบริษัทสามชัยเคมีคอล ยี่ห้อ MENZEL-GLASER, article number
BB 022022A1 ขนาด 2.2×2.2 เซนติเมตร

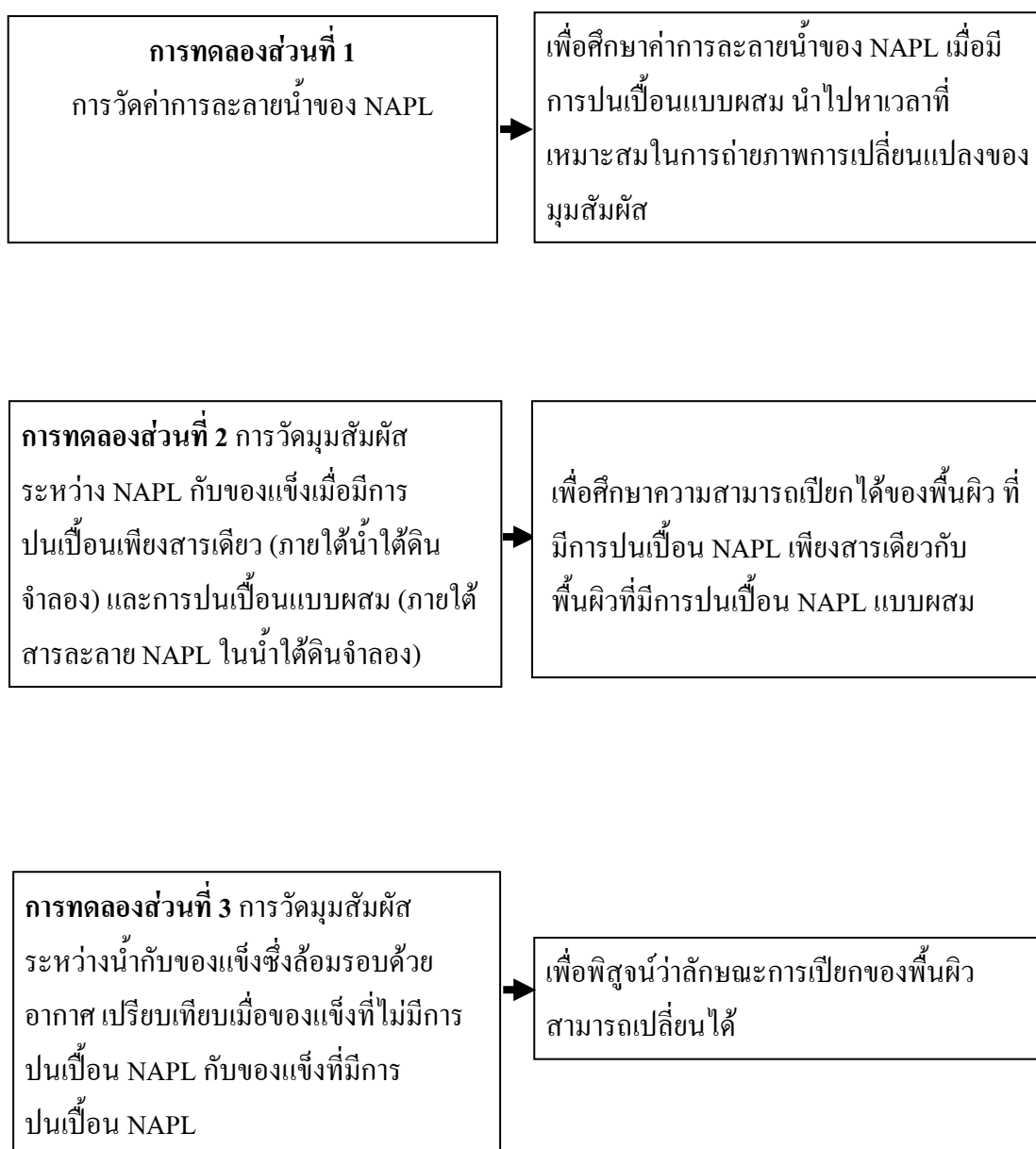
7. กล้องดิจิทัล (KONICA MINOLTA, DYNAX 7D, AF MACRO 50 mm 1:2.8 (32) D)

ใช้กล้องดิจิทัลยี่ห้อ KONICA MINOLTA โดยเลือกใช้เลนส์มาโคร DYNAX 7D ทาง
ยาวโฟกัส 50 mm และเลนส์นี้มีความไวต่อแสงหรือมีขนาดรูรับแสงเป็น 1:2.8

8. คอมพิวเตอร์และโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 (trial version)

วิธีการ

วิธีการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 17



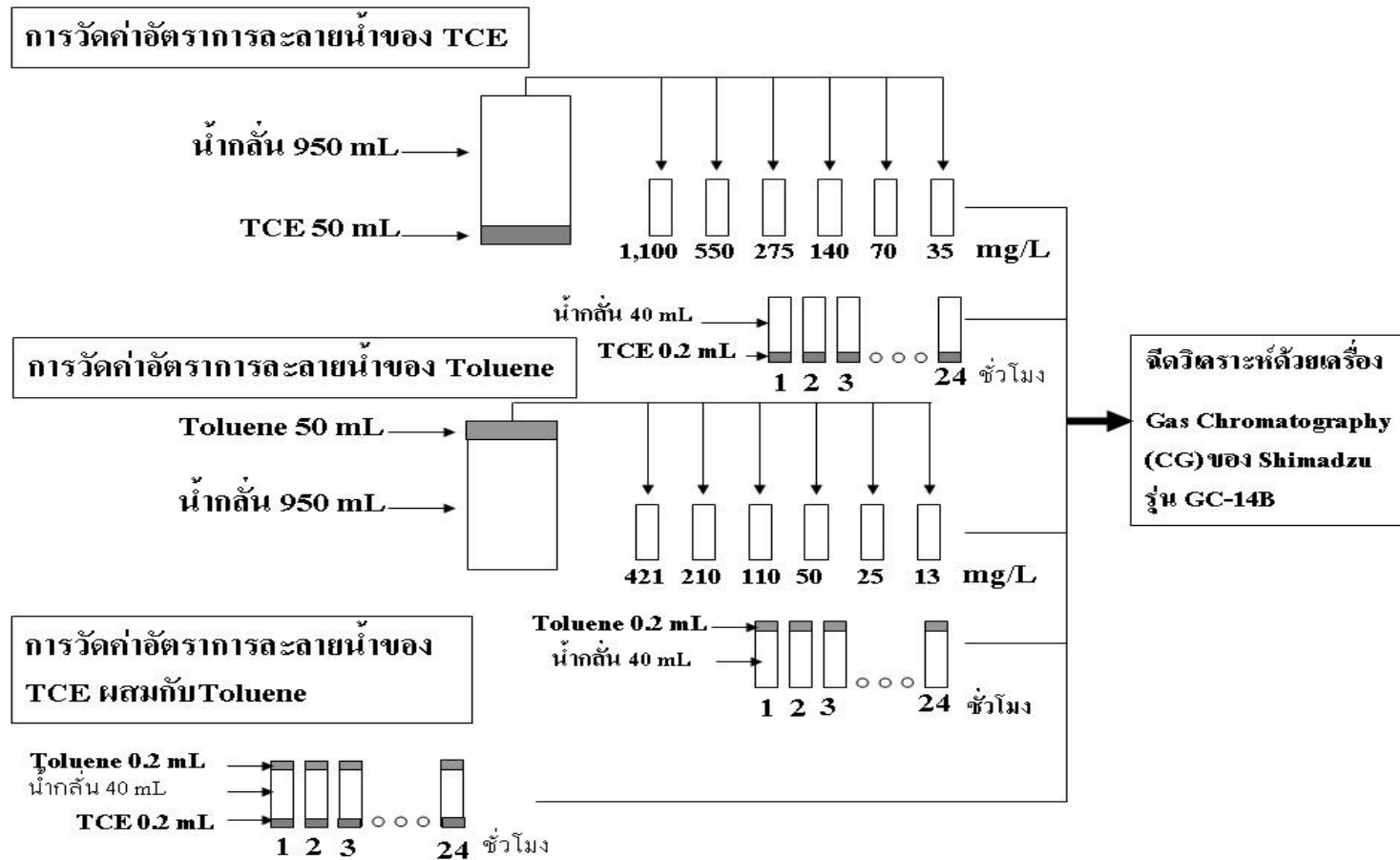
ภาพที่ 17 แผนผังการทดลอง

วิธีการทดลองส่วนที่ 1 การวัดค่าการละลายน้ำของ NAPL

สารอินทรีย์ที่ใช้คือ TCE เป็นตัวแทนของ DNAPL และ Toluene เป็นตัวแทนของ LNAPL เตรียมสารละลายมาตรฐานของ NAPL โดยเติม NAPL ปริมาตร 50 mL ในขวดทดลองขนาด 1,000 mL บรรจุน้ำกลั่น 950 mL เขย่าประมาณ 5 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25°C ประมาณ 24 ชั่วโมง สารละลายอิ่มตัวที่ได้จะมีความเข้มข้นเท่ากับค่าความสามารถในการละลายน้ำของ NAPL นั้น โดยที่ TCE มีความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับ 1,100 mg/L (Pankow and Cherry, 1995) จึงได้สารละลายอิ่มตัวของ TCE มีความเข้มข้น 1,100 mg/L จากนั้นนำมาผสมกับน้ำกลั่นโดยปรับความเข้มข้นจาก 1,100 เป็น 550, 275, 140, 70 และ 35 mg/L และ Toluene มีความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับ 421 mg/L (LaGrega *et al.*, 2001) จึงได้สารละลายอิ่มตัวของ Toluene มีความเข้มข้น 421 mg/L จากนั้นนำมาผสมกับน้ำกลั่นโดยปรับความเข้มข้นจาก 421 เป็น 210, 110, 50, 25 และ 13 mg/L และหาพื้นที่ใต้กราฟโครมาโตกราฟ (peak area) ของสารละลายมาตรฐาน TCE และ Toluene ที่ความเข้มข้นที่กำหนด โดยใช้เข็ม SPME จุ่มในสารละลาย 5 นาที และนำไปฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC จะได้ peak area ของแต่ละความเข้มข้น นำไปสร้างกราฟค่า peak area เทียบกับค่าความเข้มข้น

วิเคราะห์การละลายน้ำของ TCE เพียงสารเดียว หรือ Toluene เพียงสารเดียว ที่อุณหภูมิ 25°C โดยเตรียม TCE หรือ Toluene ปริมาตร 0.2 mL ใส่ในขวดบรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 40 mL และปิดฝาที่เคลือบด้วยแผ่น PTFE นำไปฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC หาค่าความเข้มข้นของ TCE หรือ Toluene ในน้ำ ทุก 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ค่า peak area ในแต่ละชั่วโมง จากนั้นนำค่า peak area ที่ได้ในแต่ละชั่วโมงไปแทนค่าในสมการเส้นตรงของกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน จะได้ค่าความเข้มข้นของ TCE หรือ Toluene ในแต่ละชั่วโมง และทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

วิเคราะห์การละลายน้ำของ TCE ผสมกับ Toluene ที่อุณหภูมิ 25°C โดยเตรียม TCE และ Toluene อย่างละ 0.2 ml ใส่ในขวดบรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 40 mL ปิดฝาที่เคลือบด้วยแผ่น PTFE แล้วนำไปฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC เพื่อหาค่าความเข้มข้นของ TCE และ Toluene ในน้ำ ทุก 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำค่า peak area ที่ได้ไปแทนค่าในสมการเส้นตรงของกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน จะได้ค่าความเข้มข้นของ TCE และ Toluene ซึ่งเป็นกรณีที่สาร 2 ชนิดละลายร่วมกันในน้ำ และทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ซึ่งแผนผังการทดลองส่วนที่ 1 แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แผนผังการทดลองส่วนที่ 1 การวัดค่าการละลายน้ำของ NAPL

วิธีการทดลองส่วนที่ 2 การวัดมุมสัมผัสระหว่าง NAPL กับของแข็งเมื่อสารปนเปื้อนเพียงสารเดียว (ภายใต้ น้ำใต้ดินจำลอง) และสารปนเปื้อนแบบผสม (ภายใต้ สารละลาย NAPL ในน้ำใต้ดินจำลอง)

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนและแผ่นควอตซ์ ซึ่งปรับปรุงมาจากวิธีการที่เตรียมโดย Powers and Tamblin, 1995

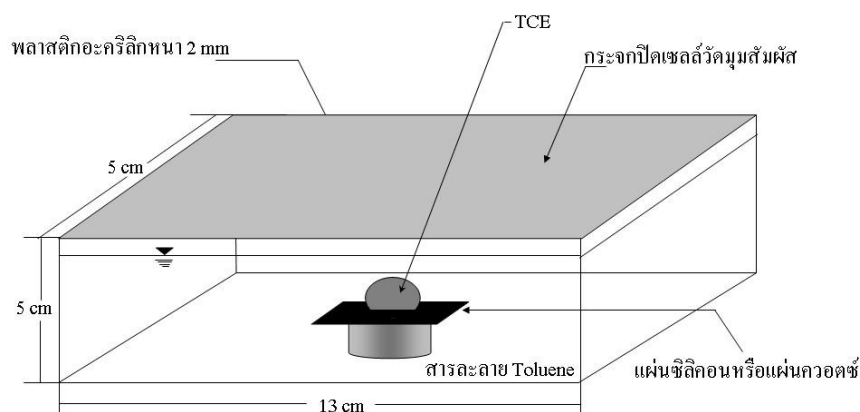
นำแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ไปเผาในเตาเผา 450 องศา เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำไปล้างด้วยกรดไนตริกเข้มข้นโดยแช่ในอ่างอัลตราโซนิก 15 นาที จากนั้นล้างกรดไนตริกออกด้วยน้ำกลั่น นำแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ล้างต่อด้วย sodium hydroxide 10 M โดยนำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิกอีก 15 นาที แล้วล้าง sodium hydroxide ออกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ล้างด้วย Iso propanol alcohol โดยนำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิก 15 นาที และล้าง Iso propanol alcohol ออกด้วยน้ำกลั่น

2. ในการทดลองวัดมุมสัมผัส จะใช้พื้นที่สำหรับวางเซลล์วัดมุมสัมผัส ที่ปรับระดับของพื้นให้เป็นระนาบที่ตรง

3. การวัดมุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นซิลิคอน ภายใต้ น้ำ, มุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นควอตซ์ ภายใต้ น้ำ

3.1 นำแผ่นซิลิคอนหรือแผ่นควอตซ์วางบนแท่นกลางเซลล์วัดมุมสัมผัส ทิ้งให้อิ่มตัวด้วยน้ำอย่างน้อย 2 วัน

3.2 ใช้ gas tight syringe หยด TCE ขนาด 150 μL ลงบนแผ่นซิลิคอนหรือควอตซ์ภายในเซลล์วัดมุมสัมผัสบรรจุ น้ำใต้ดินจำลองปริมาตร 250 mL โดยใช้ น้ำกลั่นที่ปราศจากไอออนและแก๊ส (DDD water; distilled, deionized, degassed water) เป็นการทดลองวัดมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอนหรือควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียวคือ TCE



ภาพที่ 19 เซลล์วัดมวลสัมพัทธ์ระหว่าง TCE กับแผ่นซิลิคอน ภายใต้สารละลาย Toluene

4. การวัดมวลสัมพัทธ์ระหว่าง TCE กับแผ่นซิลิคอน ภายใต้สารละลาย Toluene ดังภาพที่ 19, มวลสัมพัทธ์ระหว่าง TCE กับแผ่นควอตซ์ ภายใต้สารละลาย Toluene

4.1 นำแผ่นซิลิคอนหรือแผ่นควอตซ์ วางบนแท่นกลางเซลล์วัดมวลสัมพัทธ์ ทิ้งให้อิ่มตัวอย่าง น้อย 2 วัน ด้วยสารละลาย Toluene ความเข้มข้น 421 mg/L ซึ่งเป็นค่า solubility ของ Toluene

4.2 ใช้ gas tight syringe หยด TCE ขนาด 150 μL ลงบนแผ่นซิลิคอนหรือควอตซ์ภายใน เซลล์วัดมวลสัมพัทธ์บรรจุสารละลาย Toluene ปริมาตร 250 mL ความเข้มข้น 421 mg/L เป็นการ ทดลองวัดมวลสัมพัทธ์ของ TCE บนพื้นผิวซิลิคอนหรือควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบ ผสมระหว่าง TCE กับ Toluene

5. การวัดมวลสัมพัทธ์ระหว่าง Toluene กับแผ่นซิลิคอน ภายใต้ น้ำ, มวลสัมพัทธ์ระหว่าง Toluene กับแผ่นควอตซ์ ภายใต้ น้ำ

5.1 นำแผ่นซิลิคอนหรือแผ่นควอตซ์วางบนแท่นกลางเซลล์วัดมวลสัมพัทธ์ ทิ้งให้อิ่มตัวด้วย น้ำอย่างน้อย 2 วัน

5.2 ใช้ gas tight syringe หยด Toluene ขนาด 150 μL ลงบนแผ่นซิลิคอนหรือควอตซ์ ภายในเซลล์วัดมวลสัมพัทธ์บรรจุ DDD water ปริมาตร 250 mL เป็นการวัดมวลสัมพัทธ์ของ Toluene บน พื้นผิวซิลิคอนหรือควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียวคือ Toluene

**วิธีการทดลองส่วนที่ 3 การวัดมุลัมผัสระหว่างน้ำกับของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ
เปรียบเทียบเมื่อของแข็งที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL กับของแข็งที่มีการปนเปื้อน NAPL**

1. มุลัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ,
มุลัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

ใช้ gas tight syringe หยดน้ำขนาด 150 μL ลงบนแผ่นซิลิคอนหรือควอตซ์ที่ไม่มีการ
ปนเปื้อน TCE

2. มุลัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene ซึ่งล้อมรอบด้วย
อากาศ, มุลัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

ใช้ gas tight syringe หยดน้ำขนาด 150 μL ลงบนแผ่นซิลิคอนหรือควอตซ์ที่ไม่มีการ
ปนเปื้อน Toluene

3. มุลัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นซิลิคอนที่มีการปนเปื้อน TCE ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ, มุลัม
ผัสระหว่างน้ำกับแผ่นควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน TCE ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

3.1 นำแผ่นซิลิคอนและควอตซ์จากการทดลองส่วนที่ 3 ในข้อที่ 1 มาแช่ TCE เป็นเวลา 2
วัน เพื่อให้แผ่นซิลิคอนและควอตซ์อิ่มตัวด้วย TCE จากนั้นนำมาผึ่งให้แห้ง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.2 ใช้ gas tight syringe หยดน้ำขนาด 150 μL ลงบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ที่มีการ
ปนเปื้อน TCE

4. มุลัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นซิลิคอนที่มีการปนเปื้อน Toluene ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ,
มุลัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน Toluene ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

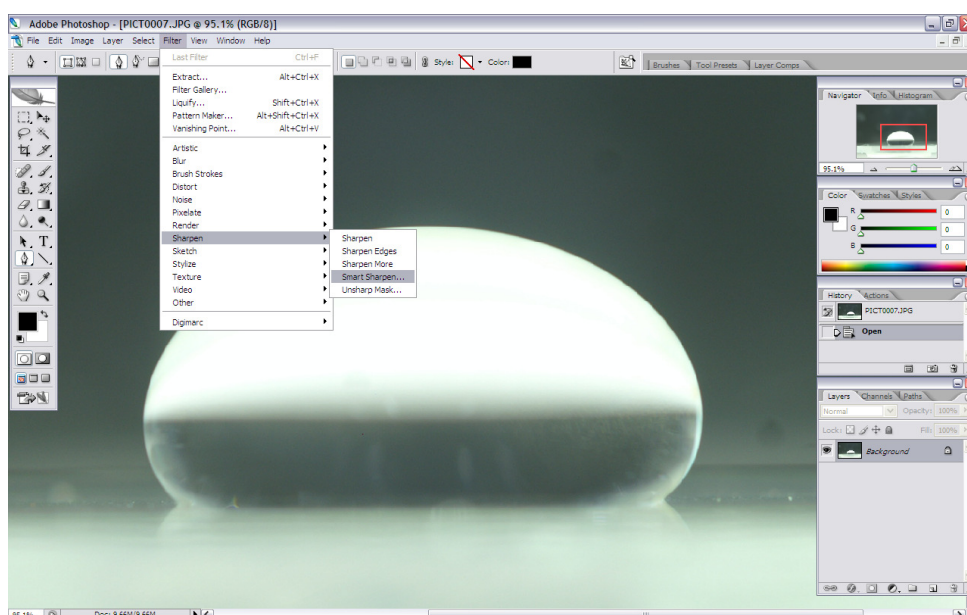
4.1 นำแผ่นซิลิคอนและควอตซ์จากการทดลองส่วนที่ 3 ในข้อที่ 2 มาแช่ Toluene เป็นเวลา
2 วัน เพื่อให้แผ่นซิลิคอนและควอตซ์อิ่มตัวด้วย Toluene จากนั้นนำมาผึ่งให้แห้ง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2 ใช้ gas tight syringe หยดน้ำขนาด 150 μL ลงบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน Toluene

5. บันทึกภาพมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นขณะนั้นเวลาเดียว

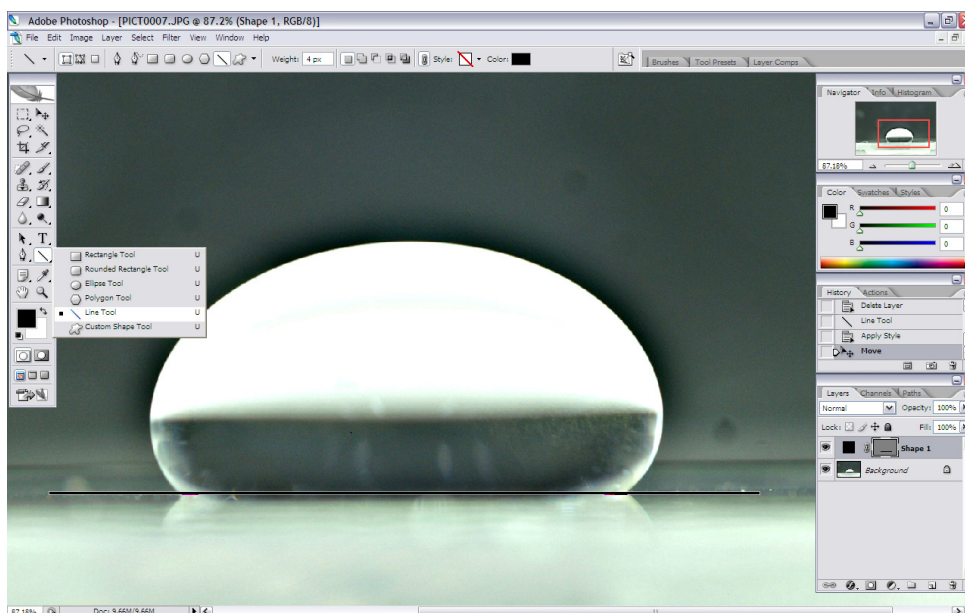
6. วัดมุมสัมผัสจากรูปดิจิทัลด้วยโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)

6.1 ใช้คำสั่ง filter ให้ภาพมีความคมชัดที่ขอบของหยด TCE มีความเปรียบต่าง (contrast) กับพื้นหลังซึ่งเป็นน้ำ เพื่อความถูกต้องของมุมสัมผัสที่ต้องการวัด โดยการเลือก filter $\rightarrow$ sharpen $\rightarrow$ smart sharpen ดังภาพที่ 21



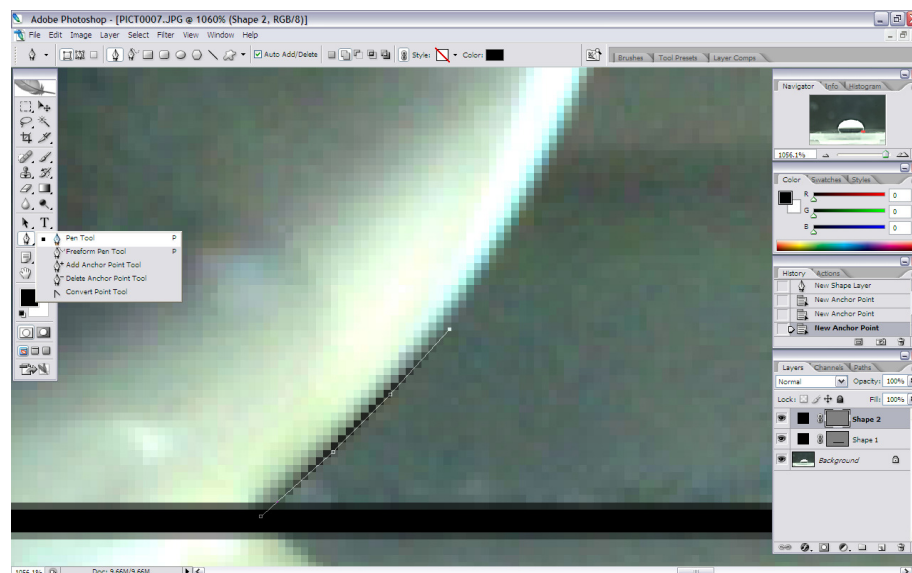
ภาพที่ 21 การเลือกคำสั่ง filter ในโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)

6.2 เลือก line tool เพื่อวาดเส้นที่อยู่บนระนาบระหว่างของแข็งกับหยดของ TCE ดังภาพที่



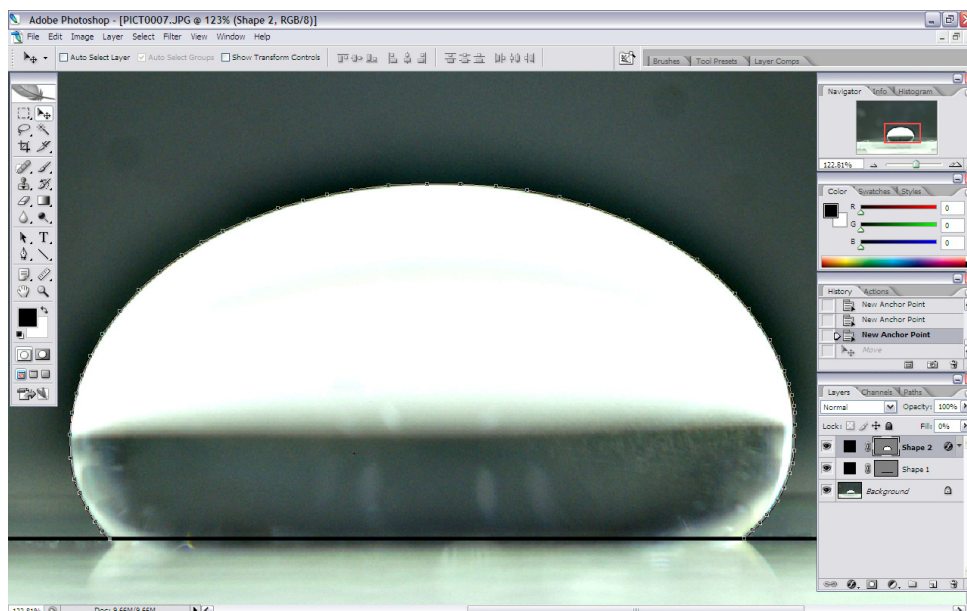
ภาพที่ 22 การเลือก line tool ในโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)

6.3 ขยายภาพประมาณ 1,000 % เพื่อให้เห็นช่อง pixel ที่ขอบ และเลือก pen tool เพื่อวาดขอบ ดังภาพที่ 23



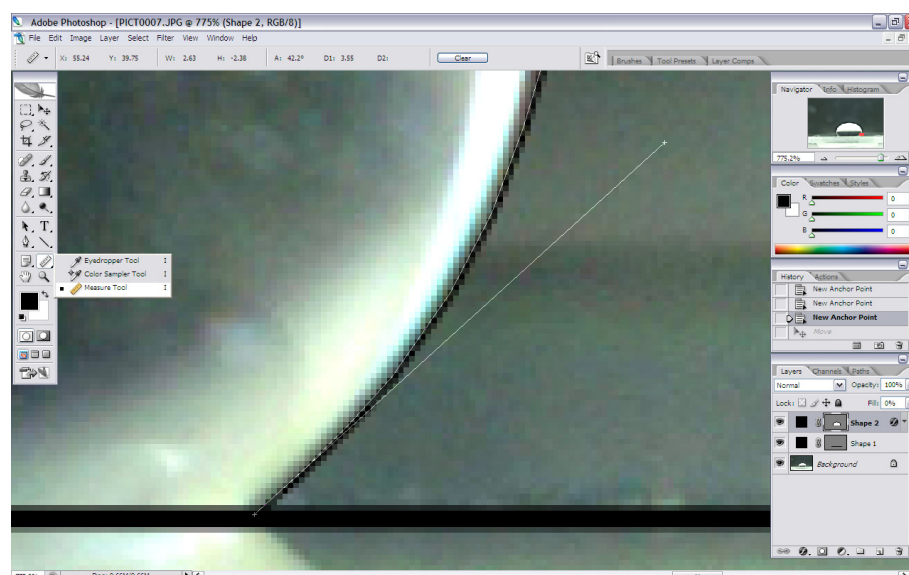
ภาพที่ 23 การเลือก pen tool ในโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)

6.4 จะได้ขอบของหยด NAPL ดังภาพที่ 24



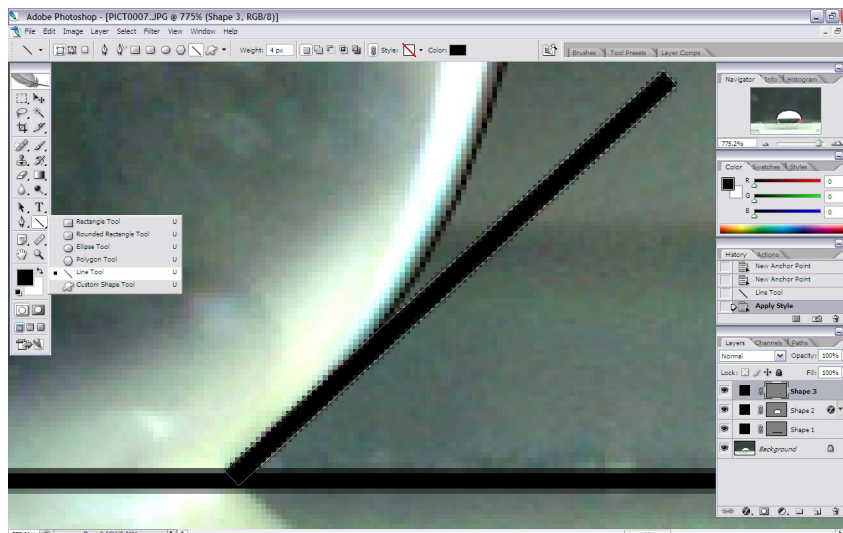
ภาพที่ 24 ขอบที่วาดจากคำสั่ง pen tool ในโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)

6.5 เลือกคำสั่ง measure tool เพื่อหาขนาดของมุมสัมผัส ดังภาพที่ 25



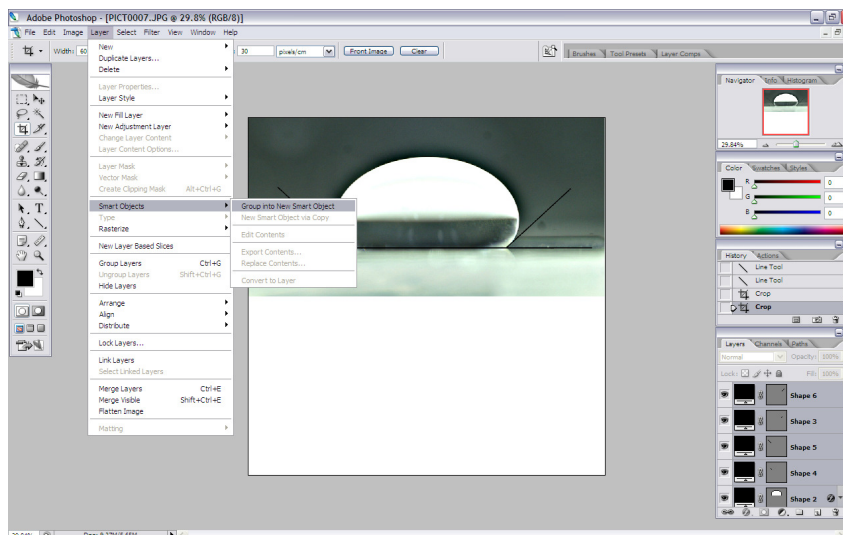
ภาพที่ 25 การใช้ measure tool หาขนาดของมุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นควอตซ์
ซึ่งวัดได้ 42.2 องศา

6.6 เลือก line tool เพื่อวาดขนาดของมุมสัมผัสที่วัดได้ ดังภาพที่ 26



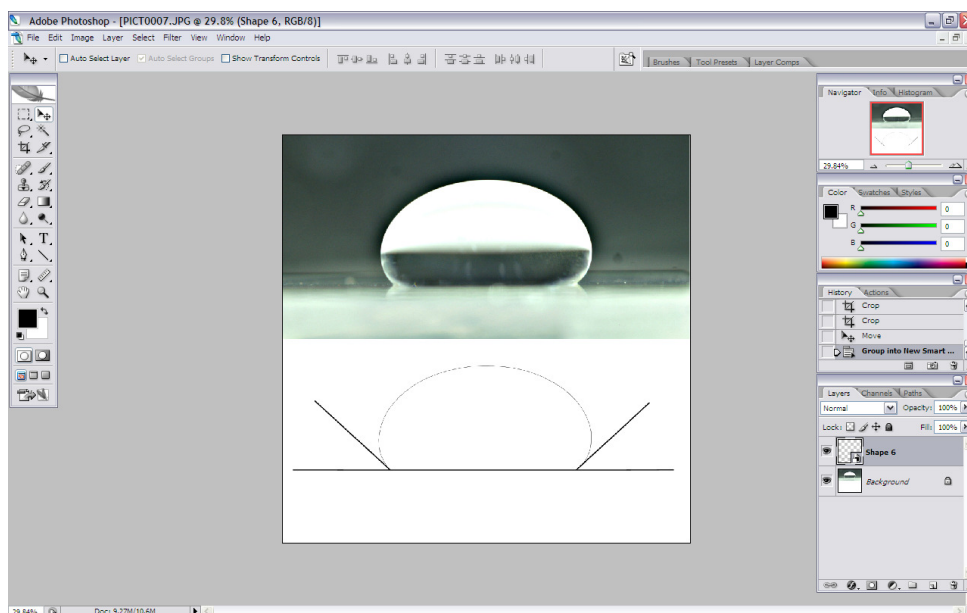
ภาพที่ 26 เส้นแสดงขนาดของมุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นควอตซ์ ด้วยคำสั่ง line tool

6.7 รวม layer ที่สร้างขึ้นทั้งหมดโดยใช้ group into new smart object โดยเลือก layer → smart objects → group into new smart object เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมสัมผัสที่วัดได้ในขณะที่มีการย้าย layer ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การรวม layer โดยใช้ group into new smart object

6.8 ย้ายเส้นที่แสดงขนาดของมุมสัมผัส เพื่อแสดงให้เห็นขนาดของมุมสัมผัส จะได้ภาพของมุมสัมผัสที่วัดจากรูปดิจิทัลด้วยโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version) แสดงดังภาพที่ 28



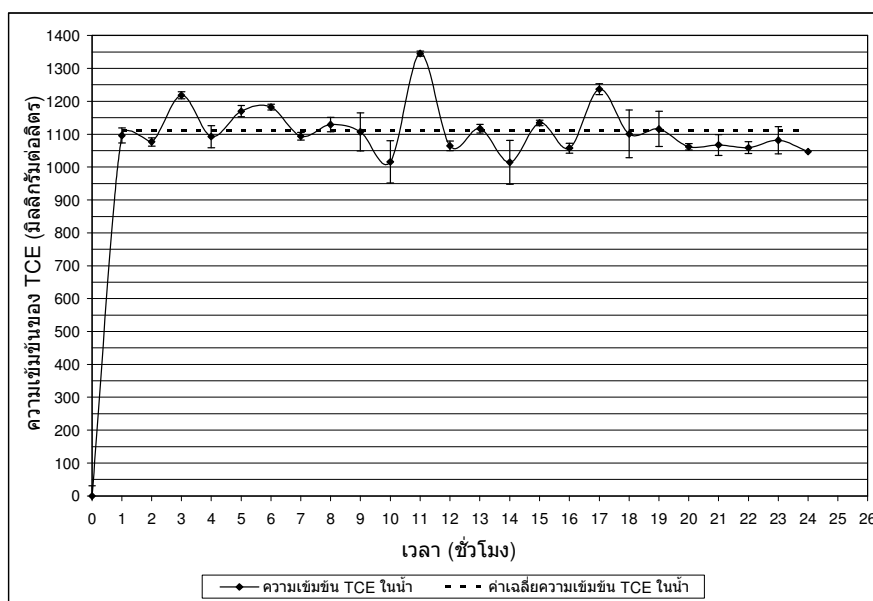
ภาพที่ 28 มุมสัมผัสที่วัดจากรูปดิจิทัลด้วยโปรแกรม Photoshop CS2 (trial version)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองส่วนที่ 1 การวัดค่าการละลายน้ำของ NAPL

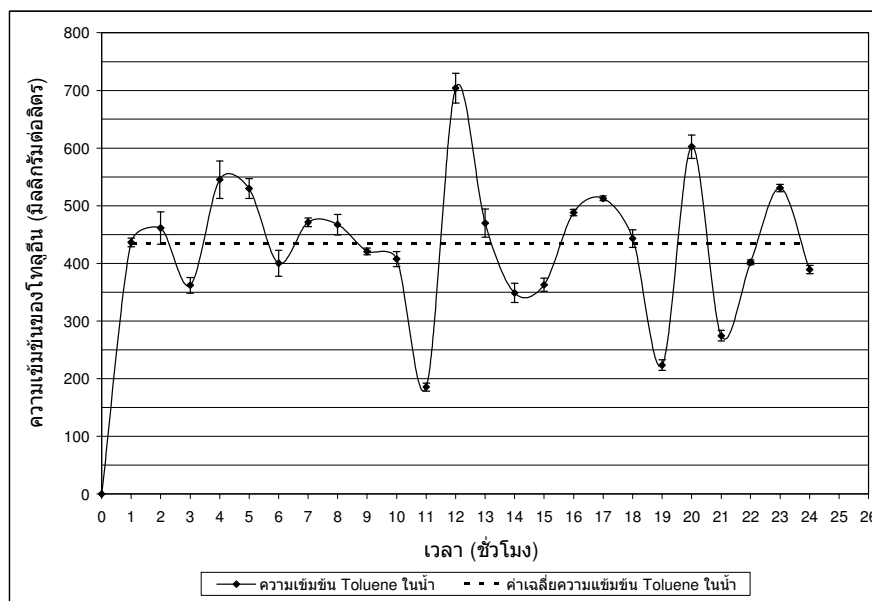
1. การวัดค่าการละลายน้ำของ TCE เพียงสารเดียว ที่อุณหภูมิ 25°C

จากการทดลองเมื่อนำ TCE (pure phase) ใส่ในน้ำ แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของ TCE ในน้ำด้วยเครื่อง GC ทุก 1 ชั่วโมง จนถึงชั่วโมงที่ 24 ได้ดังภาพที่ 29 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ TCE ในน้ำกับเวลา และค่า SD ของความเข้มข้น TCE ในน้ำในแต่ละชั่วโมงได้มาจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ TCE ในน้ำมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ TCE มีค่าเท่ากับ $1,096.0 \pm 31$ mg/L และ TCE มีค่าความเข้มข้นในน้ำค่อนข้างคงที่ไปตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นค่าความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ $1,112 \pm 75$ mg/L



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ TCE ในน้ำกับเวลา

2. การวัดค่าการละลายน้ำของ Toluene เพียงสารเดียว ที่อุณหภูมิ 25°C



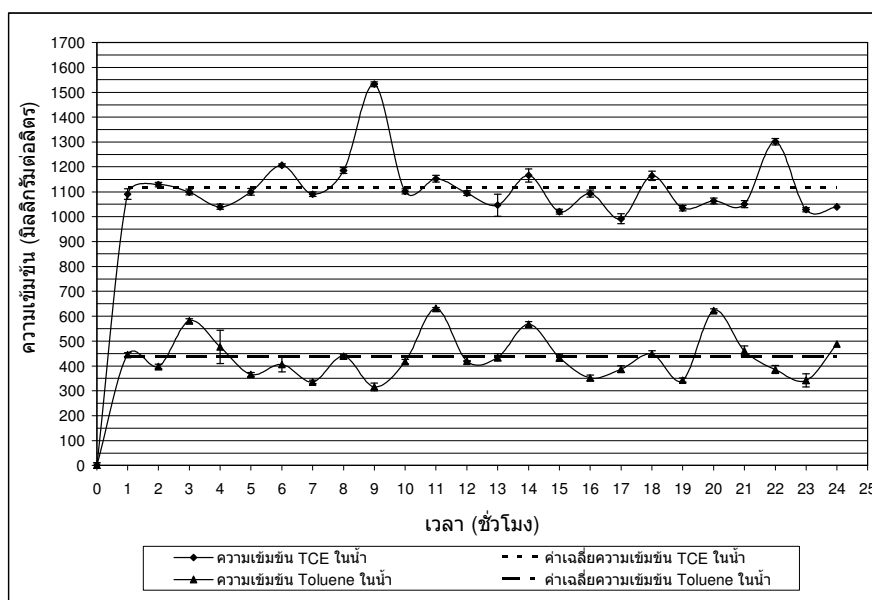
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Toluene ในน้ำกับเวลา

จากภาพที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Toluene ในน้ำกับเวลา ซึ่งได้จากการทดลองโดยการนำ Toluene (pure phase) ใส่ในน้ำ แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของ Toluene ที่ละลายในน้ำเพียงสารเดียวด้วยเครื่อง GC ทุก 1 ชั่วโมง จนถึงชั่วโมงที่ 24 และค่า SD ของความเข้มข้น Toluene ในน้ำในแต่ละชั่วโมงได้มาจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Toluene ในน้ำมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ Toluene มีค่าเท่ากับ 436.5 ± 7 mg/L และมีค่าค่อนข้างคงที่ไปตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 435 ± 114 mg/L

3. การวัดค่าการละลายน้ำของ TCE ผสมกับ Toluene ที่อุณหภูมิ 25°C

เมื่อทำการทดลองนำ TCE (pure phase) ผสมกับ Toluene (pure phase) ใส่ในน้ำ แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของ TCE และ Toluene ในน้ำ ซึ่งละลายร่วมกัน ด้วยเครื่อง GC ทุก 1 ชั่วโมง จนถึงชั่วโมงที่ 24 และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จึงทำให้ได้ค่า SD ของความเข้มข้น TCE และ Toluene ในแต่ละชั่วโมง จากภาพที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ TCE และความเข้มข้นของ Toluene ในน้ำเทียบกับเวลา ซึ่งพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ TCE และ Toluene ในน้ำมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง น้ำมีค่าความเข้มข้นของ TCE เท่ากับ $1,090.3 \pm 11$ mg/L และ Toluene เท่ากับ 445.1 ± 11 mg/L ซึ่งความเข้มข้นของ TCE และ Toluene ค่อนข้างคงที่ไป

ตลอด 24 ชั่วโมง โดย TCE มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นเท่ากับ $1,117 \pm 113$ mg/L และ Toluene เท่ากับ 437 ± 88 mg/L



ภาพที่ 31 ความเข้มข้นของ TCE และ Toluene ซึ่งละลายร่วมกันในน้ำเทียบกับเวลา

จากการทดลองที่อุณหภูมิ 25°C เมื่อเปรียบเทียบการละลายของ TCE หรือ Toluene ในน้ำเพียงสารเดียว กับการละลายของ TCE และ Toluene ร่วมกันในน้ำ พบว่าค่าความเข้มข้นของ TCE ในน้ำที่เกิดจากการละลายน้ำทั้งสองกรณีต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ และพบว่ามีผลในทางเดียวกันกับ Toluene

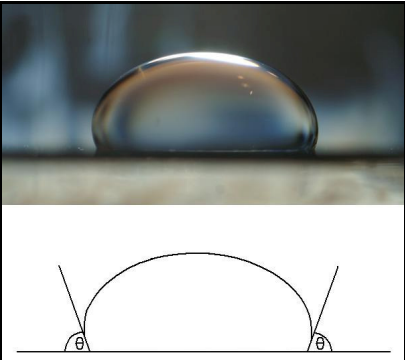
ดังนั้นการละลายร่วม (cosolvent) จึงไม่มีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของ TCE หรือ Toluene ซึ่ง Lee and Peters (2004) กล่าวถึงการละลายร่วมกันของสารยังขึ้นกับพฤติกรรมการแบ่งแยกตัวของสารนั้น โดยพิจารณาจาก 1) เมื่อแรงดึงดูดระหว่าง NAPL กับน้ำลดลง ทำให้ NAPL เกิดการเคลื่อนที่แทรกตัวในน้ำได้มากขึ้น ในขณะที่ NAPL กับน้ำแยกตัวจากกัน 2) การที่ NAPL สามารถละลายในน้ำได้มากทำให้ NAPL เคลื่อนตัวและแทรกอยู่ในน้ำทำให้ค่าความเข้มข้นของ NAPL ในน้ำมากขึ้นจนกระทั่งเป็นน้ำกลายเป็นสารละลาย NAPL และ 3) ปริมาตร ความหนาแน่น และความหนืดของ NAPL ที่ต่างกัน โดยที่ NAPL ที่มีปริมาตรมาก ความหนืดก็มีค่ามากด้วย

การทดลองส่วนที่ 2 มุมสัมผัสระหว่าง NAPL กับของแข็งเมื่อสารปนเปื้อนเพียงสารเดียว (ล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง) และสารปนเปื้อนแบบผสม (ล้อมรอบด้วยสารละลาย NAPL ในน้ำใต้ดินจำลอง)

1. สภาพไว (sensitivity) ของการวัดมุม

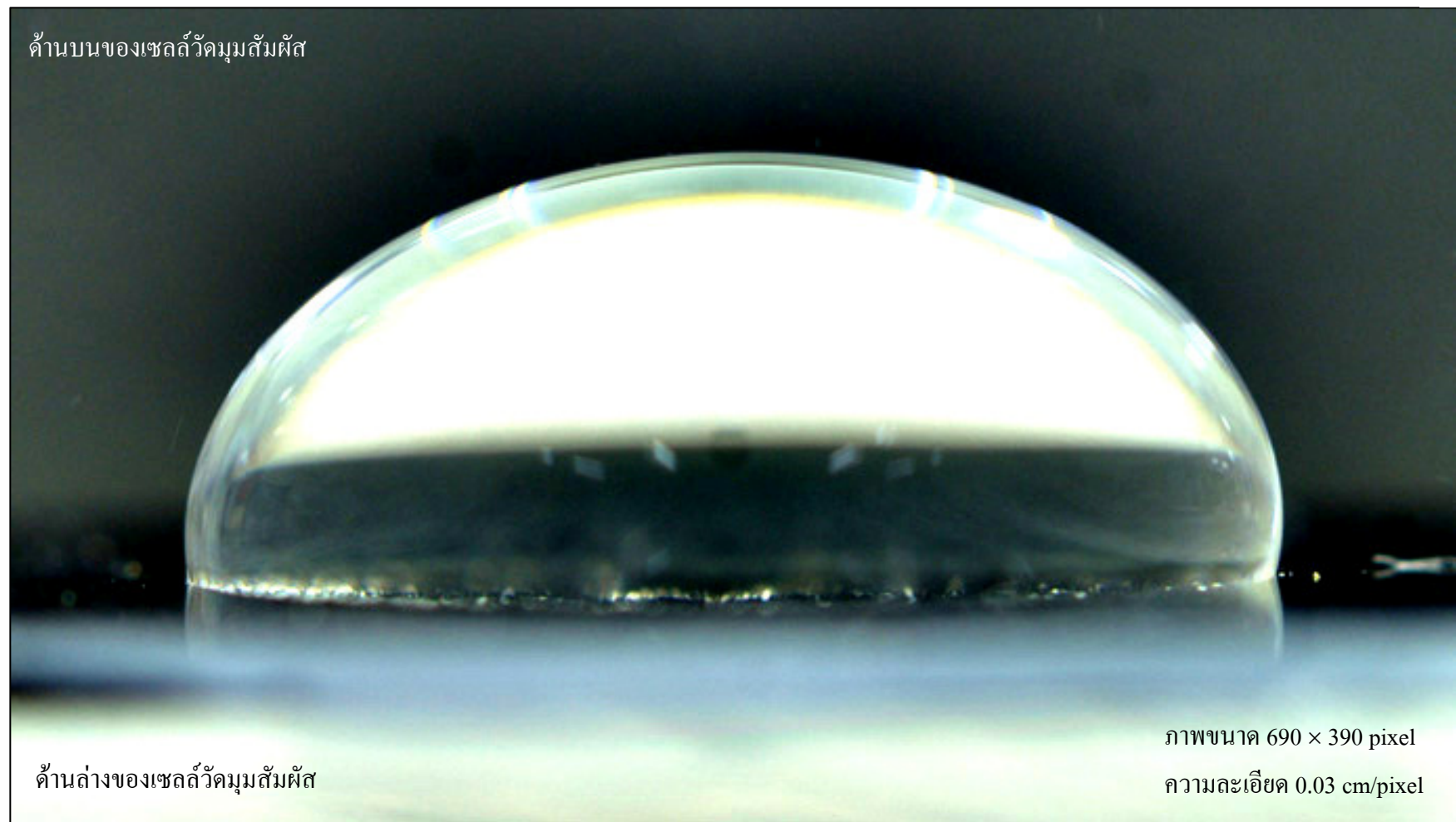
เมื่อทำการทดลองวัดมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene ที่มีความเข้มข้น 421 mg/L ซึ่งเท่ากับค่าความสามารถในการละลายน้ำของ Toluene และถ่ายภาพมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้น จากนั้นนำภาพถ่ายดิจิทัลมาวัดมุมสัมผัสด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 (trial version) ซึ่งวัดมุมสัมผัสทางด้านซ้ายและขวาข้างละ 3 ครั้ง ได้ผลขนาดของมุมสัมผัสดังตารางที่ 7 และหาค่ามุมที่ต่างกันจากการวัดทั้งสามครั้งแล้วนำมาเฉลี่ยได้เท่ากับ 1.9° ดังนั้น sensitivity ของการวัดอยู่ที่มุม 1.9° และเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับการทดลองวัดมุมสัมผัสมาตรฐานในงานวิจัยอื่น

ตารางที่ 7 sensitivity (สภาพไว) ของการวัดมุมโดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS2 (trial version)

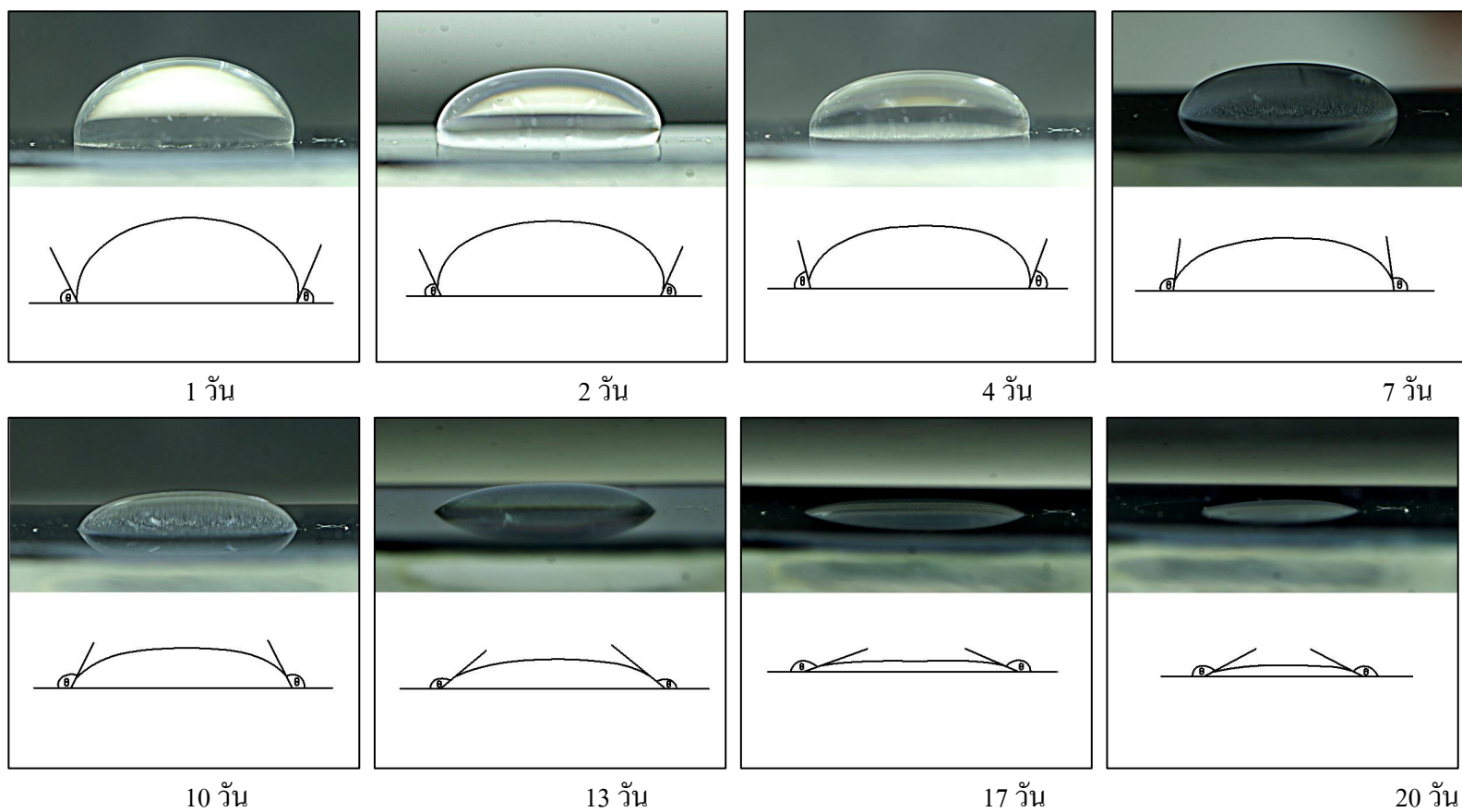
ภาพ	ครั้งที่	มุมสัมผัส(องศา)	
		ซ้าย	ขวา
	1	71.0	68.7
	2	72.9	70.1
	3	70.8	70.4
		$\Delta\theta = 2.1$	$\Delta\theta = 1.7$
		$\theta_{\text{average}} = 1.9$	

2. มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

หลังจากทำการทดลองวัดมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ และถ่ายภาพของมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้น ได้ภาพมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอนดังแสดงภาพที่ 32 และบันทึกภาพของ TCE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาโดยถ่ายภาพทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสทุกวันจนกระทั่ง TCE มีมวลลดลงจนเหลือน้อยมากและมุมสัมผัสค่อนข้างคงที่ ซึ่งการลดลงของมวล TCE เกิดจากการถ่ายเทมวลในระบบ การทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 20 วัน และนำภาพที่ได้จากการทดลองมาแสดงผลขนาดของมุมสัมผัสในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในภาพที่ 33

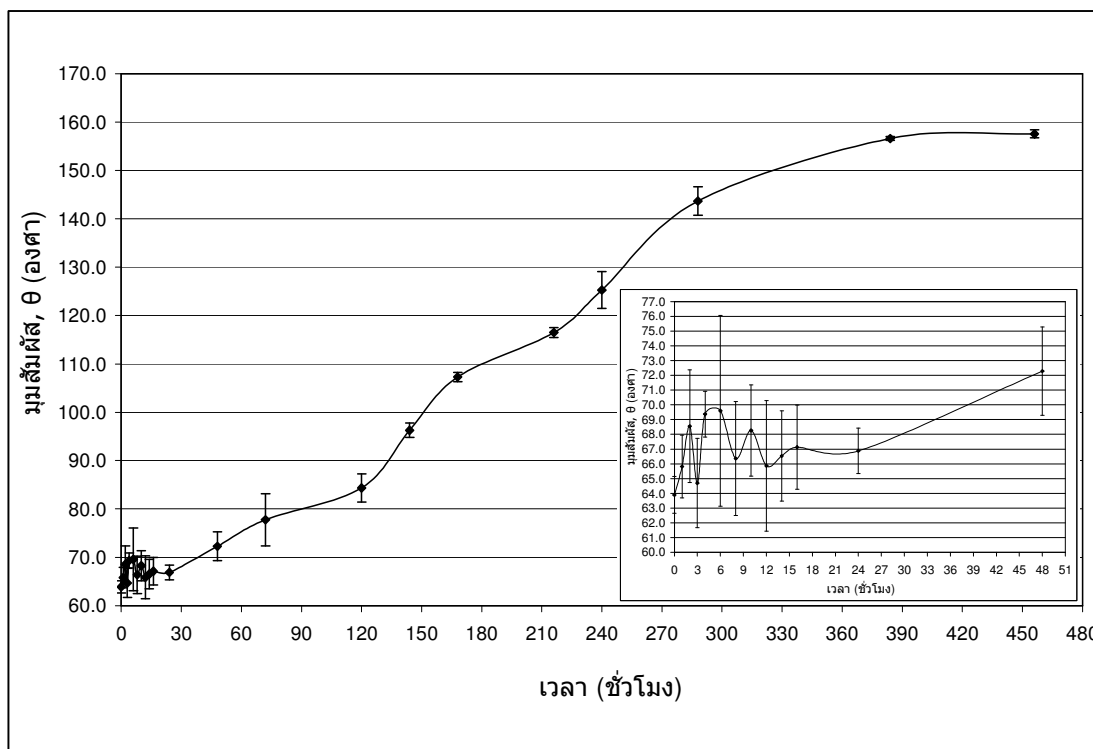


ภาพที่ 32 มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ



ภาพที่ 33 การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของ TCE บนแผ่นซิลิคอนซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ความละเอียดของภาพ 0.03 cm/pixel

เมื่อสร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของ TCE เทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอนซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำกับเวลา

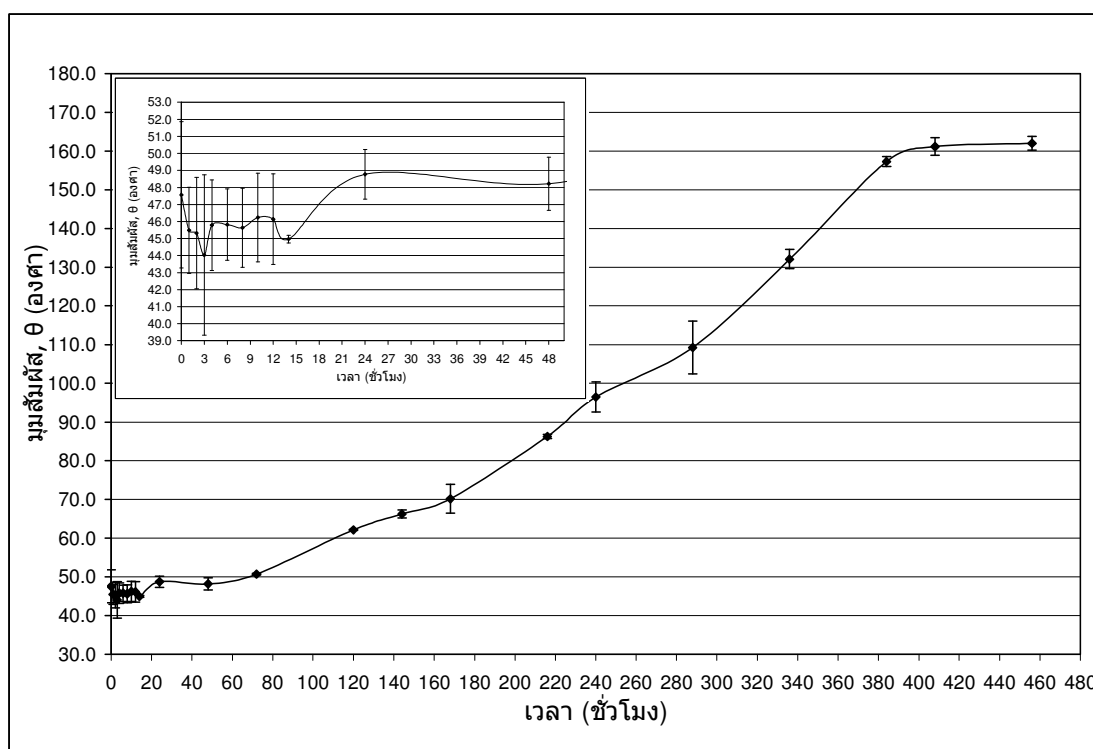
จากการทำการทดลอง 3 ครั้ง ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมุมในแต่ละเวลา และมีค่า SD ที่เกิดจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง โดยช่วงเริ่มต้นพบว่ามุมสัมผัสมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนถึง 24 ชั่วโมง โดยอาจกล่าวได้ว่ากราฟมีความชันเป็นศูนย์ในเบื้องต้น และมีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ 63.9 องศา หลังจากผ่าน 24 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 288 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยความชันของกราฟเท่ากับ 0.3 และเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเวลาผ่านไปมวลของ TCE ลดลงเนื่องจากเกิดการถ่ายเทมวลสาร จนกระทั่งที่เวลา 456 ชั่วโมง มุมสัมผัสค่อนข้างคงที่และมีมุมสัมผัสเท่ากับ 157.6 องศาด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ และมวลของ TCE ลดลงจนเหลือน้อยมาก

3. มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

หลังจากทำการทดลองวัดมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ เมื่อถ่ายภาพของมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้น ซึ่งมีผลคล้ายกันกับภาพที่ 32 และ 33 บันทึกภาพของ

TCE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาโดยถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสทุกวันจนกระทั่ง TCE มีมวลลดลงจนเหลือน้อยมากและมุมสัมผัสค่อนข้างคงที่ ซึ่งการทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 20 วัน

เมื่อสร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำเทียบกับที่ เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 35



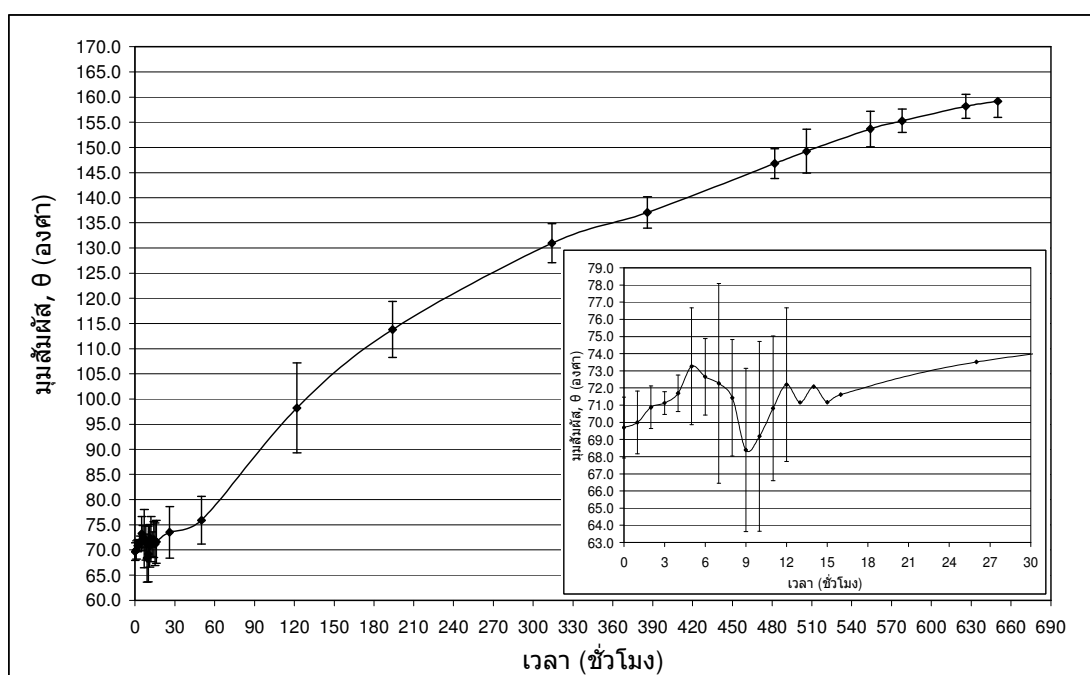
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำกับเวลา

จากการทำการทดลอง 3 ครั้ง จึงได้ค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสในแต่ละช่วงเวลา และมีค่า SD ที่เกิดจากการทดลองซ้ำกัน 3 ครั้ง สังเกตผลจากภาพที่ 35 ในแต่ละช่วงเวลา พบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนถึงเวลา 14 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 45.7 องศา หลังจากผ่าน 14 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 24 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยความชันของกราฟเท่ากับ 0.4 และเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในขณะที่เวลาผ่านไป มวลของ TCE ลดลงเนื่องจากเกิดการถ่ายเทมวลสาร จนกระทั่งที่เวลา 456 ชั่วโมง มุมสัมผัสค่อนข้างคงที่ที่มุม 162.0 องศาด้วยความชันเป็นศูนย์ และมวลของ TCE ลดลงจนเหลือน้อยมาก

4. มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene

เมื่อทำการทดลองวัดมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene พบว่าภาพแสดงผลของมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอน คล้ายกับภาพที่ 32 และ 33 บันทึกภาพมุมสัมผัสของ TCE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจนกระทั่งมวลของ TCE ลดลงจนเหลือน้อยมากและมุมสัมผัสค่อนข้างคงที่ โดยการทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 28 วัน

เมื่อสร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene เทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 36



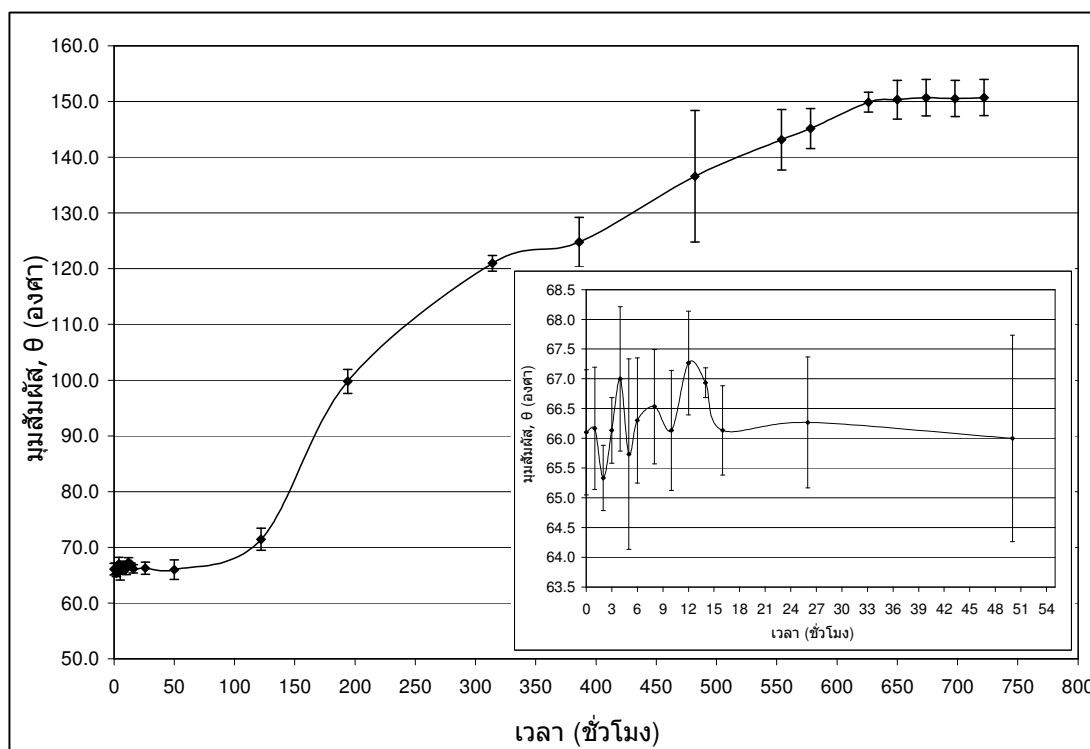
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene กับเวลา

จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เมื่อถ่ายภาพและวัดมุมสัมผัสในแต่ละช่วงเวลา ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยและค่า SD ที่เกิดจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง และพบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนถึงเวลา 16 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 71.2 องศา หลังจากผ่าน 16

ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 626 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยความชันของกราฟเท่ากับ 0.1 ในขณะที่เวลาเปลี่ยนไปมวลของ TCE ลดลงเนื่องจากเกิดการถ่ายเทมวลสารและหลังจาก 626 ชั่วโมง มุมสัมผัสคงที่ 159.2 องศาด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ และมวลของ TCE ลดลงจนเหลือน้อยมาก

5. มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene

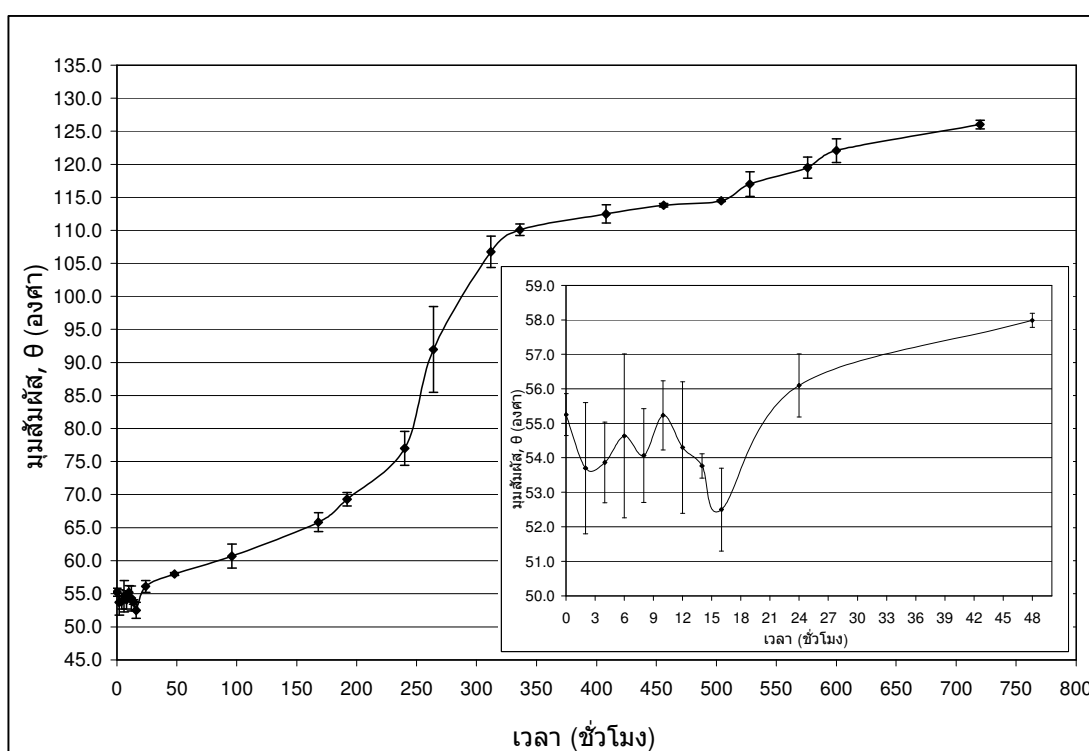
เมื่อทำการทดลองวัดมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene พบว่าภาพจากผลการทดลองมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ มีผลคล้ายกับภาพที่ 32 และ 33 บันทึกภาพมุมสัมผัสของ TCE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จนกระทั่งมวลของ TCE ลดลงจนเหลือน้อยมากและมุมสัมผัสค่อนข้างคงที่ โดยการทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 30 วัน



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene กับเวลา

เมื่อสร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene เทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 37 ซึ่งได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสในแต่ละช่วงเวลา และค่า SD ซึ่งเกิดจากการถ่ายภาพและวัดมุมจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนถึงเวลา 50 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 66.3 องศา หลังจากผ่าน 50 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 626 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยความชันของกราฟเท่ากับ 0.1 และเมื่อเวลาผ่านไปมวลของ TCE ลดลงเนื่องจากการถ่ายเทมวลสาร โดยที่หลังจาก 626 ชั่วโมง มุมสัมผัสค่อนข้างคงที่ที่มุม 150.7 องศาด้วยความชันเป็นศูนย์ และมวลของ TCE ลดลงจนเหลือน้อยมาก

6. มุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำกับเวลา

จากการทำการทดลองวัดมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ พบว่าภาพแสดงผลมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน คล้ายกันกับผลดังแสดงในภาพที่ 41

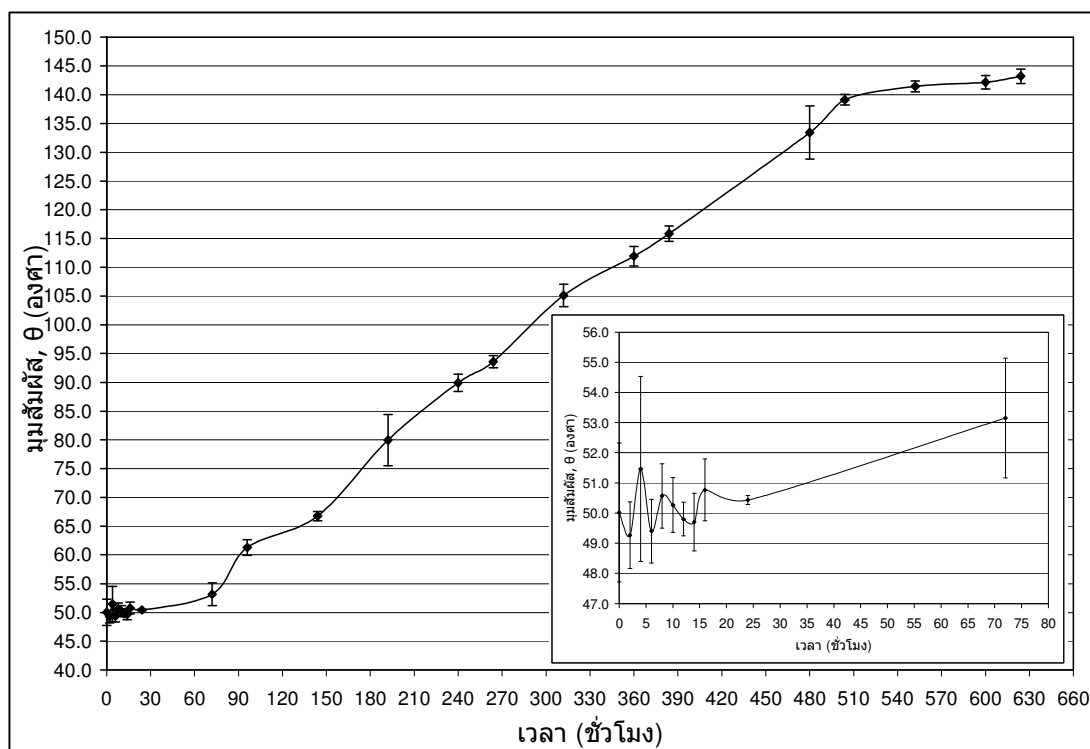
และ 42 บันทึกภาพมุมสัมผัสของ Toluene ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจนกระทั่งมวลของ Toluene ลดลงจนเหลือน้อยมากและมุมสัมผัสค่อนข้างคงที่ โดยการทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 26 วัน

เมื่อสร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำเทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 38 ซึ่งได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสในแต่ละช่วงเวลาและค่า SD ที่เกิดจากการถ่ายภาพและวัดมุมของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง เมื่อสังเกตผลพบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนถึงเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 55.2 องศา หลังจากผ่าน 24 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 192 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงชั่วโมงที่ 264 จากนั้นมุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่เวลาผ่านไปเกิดการถ่ายเทมวลสารทำให้ Toluene มีมวลลดลง จนกระทั่งที่เวลา 552 ชั่วโมง มุมสัมผัสเริ่มคงที่ 138.5 องศา ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ และมวลของ Toluene ลดลงจนเหลือน้อยมาก

7. มุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

จากการทำการทดลองวัดมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ พบว่าภาพผลการทดลองวัดมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ มีผลคล้ายกับภาพที่ 41 และ 42 บันทึกภาพมุมสัมผัสของ Toluene ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจนกระทั่งมวลของ Toluene ลดลงจนเหลือน้อยมากและมุมสัมผัสค่อนข้างคงที่ โดยการทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 22 วัน

โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสในแต่ละเวลา และมีค่า SD ที่เกิดจากการถ่ายภาพและวัดมุมสัมผัสจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 39 ในแต่ละช่วงเวลา พบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนถึงเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 50.2 องศา หลังจากผ่าน 24 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 504 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในขณะที่เวลาผ่านไปมวลของ Toluene ลดลงเนื่องจากเกิดการถ่ายเทมวลสาร และเมื่อผ่าน 504 ชั่วโมง มุมสัมผัสจะเริ่มคงที่ 143.2 องศา ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ และมวลของ Toluene ลดลงจนเหลือน้อยมาก

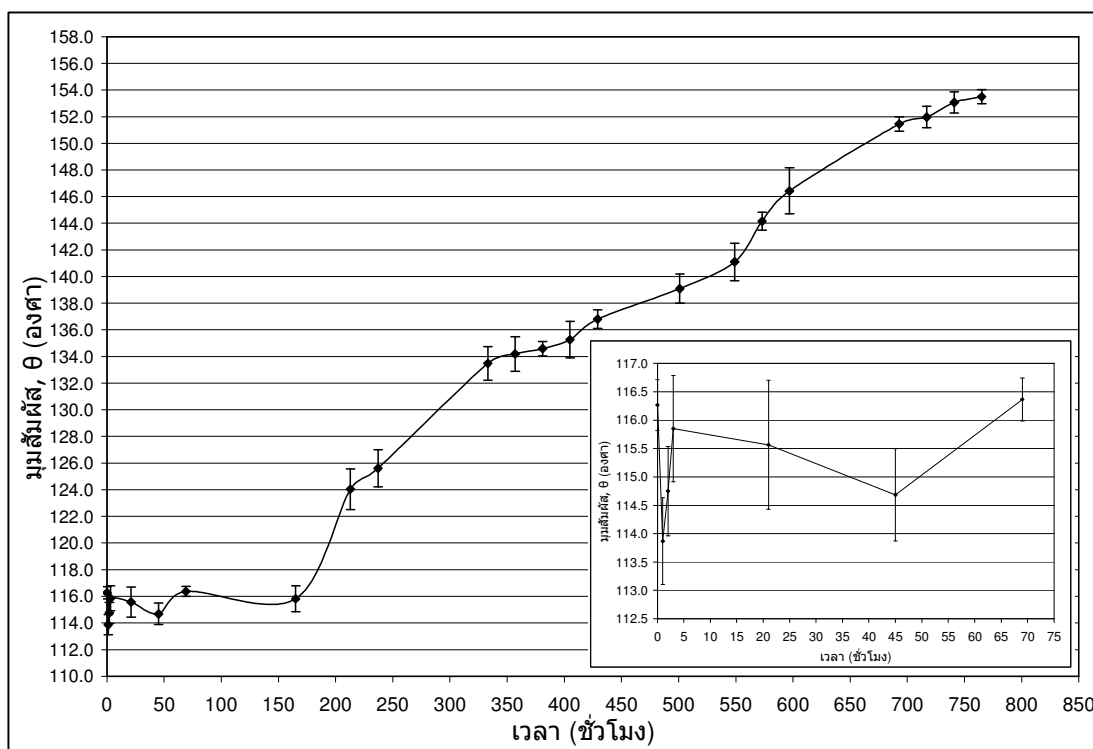


ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างมมสัณพัสของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำกับ เวลา

8. มมสัณพัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE

จากการทดลองวัดมมสัณพัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE พบว่าภาพผลการทดลองวัดมมสัณพัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน คล้ายกับภาพที่ 41 และ 42 บันทึกภาพมมสัณพัสของ Toluene ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจนกระทั่งมวลของ Toluene ลดลงจนเหลือน้อยมากและมมสัณพัสค่อนข้างคงที่ โดยการทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 30 วัน

เมื่อสร้างกราฟระหว่างมมสัณพัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE เทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 40



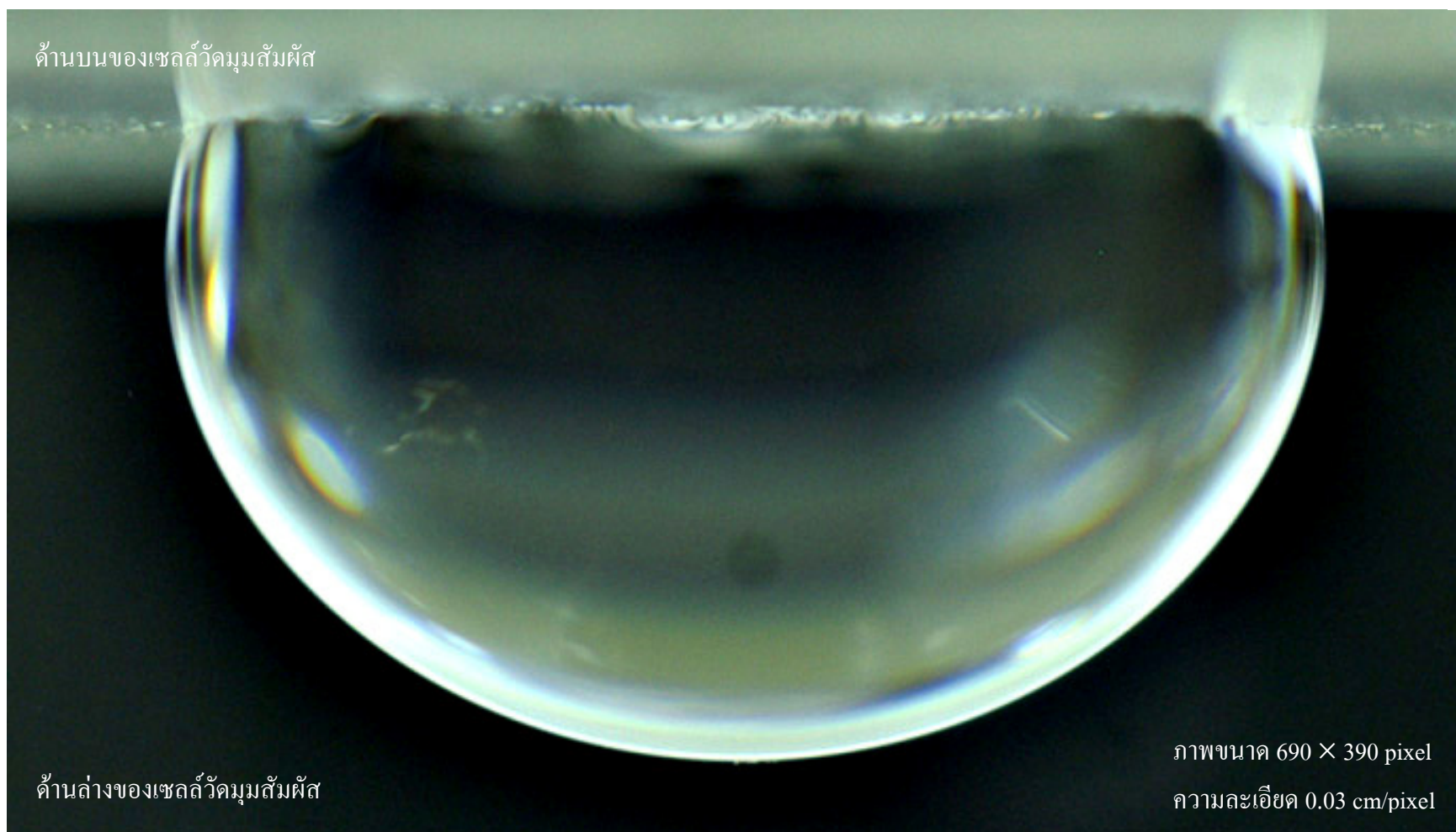
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างมมัลล์ของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE กับเวลา

จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมมัลล์ในแต่ละเวลาและมีค่า SD ที่เกิดจากการถ่ายภาพและวัดมมัลล์จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 40 พบว่ามมัลล์ในตอนเริ่มต้นมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนถึงเวลา 165 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมมัลล์ 115.4 องศา หลังจากผ่าน 165 ชั่วโมง ไปจนถึงชั่วโมงที่ 741 มมัลล์เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยความชันของกราฟเท่ากับ 0.1 ซึ่งในขณะที่เวลาผ่านไปเกิดการถ่ายเทมวลสารของ Toluene ทำให้มวลของ Toluene ลดลง จนกระทั่งหลังจาก 765 ชั่วโมง มมัลล์ค่อนข้างคงที่ที่มมัลล์ 153.5 องศา ด้วยความชันเป็นศูนย์ และมวลของ Toluene ลดลงจนเหลือน้อยมาก

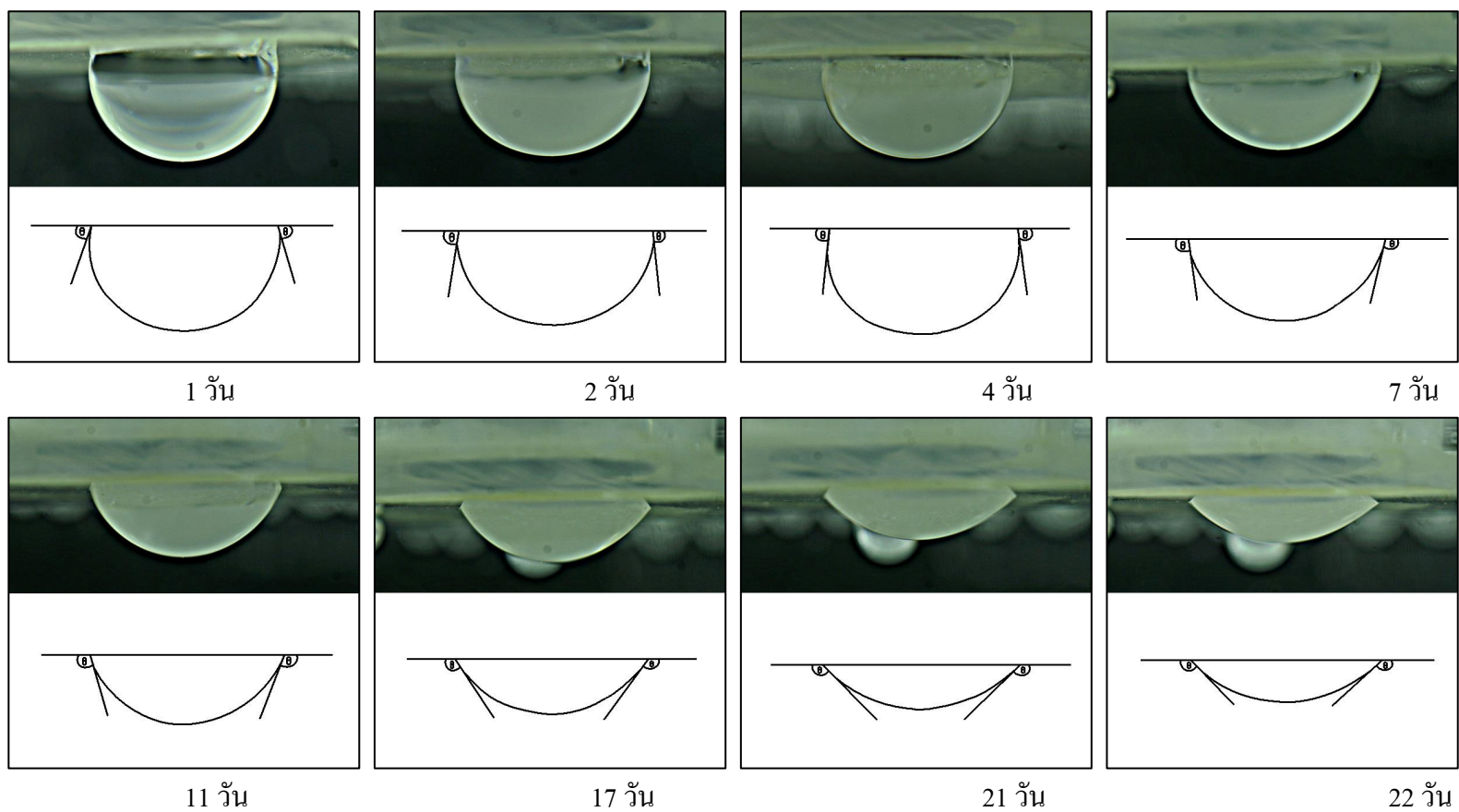
9. มมัลล์ของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE

หลังจากทำการทดลองวัดมมัลล์ของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE และถ่ายภาพของมมัลล์ที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้น ได้ภาพมมัลล์ของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ดังแสดงภาพที่ 41 และบันทึกภาพของ Toluene ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาโดย

ถ่ายภาพทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงของมูมส์แต่ละตัวทุกวันจนกระทั่ง Toluene มีมวลลดลงจนเหลือน้อยมากและมูมส์กลับขึ้นข้างคางที่ ซึ่งการทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 22 วัน และนำภาพที่ได้จากการทดลองมาแสดงผลขนาดของมูมส์แต่ละตัวในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในภาพที่ 42

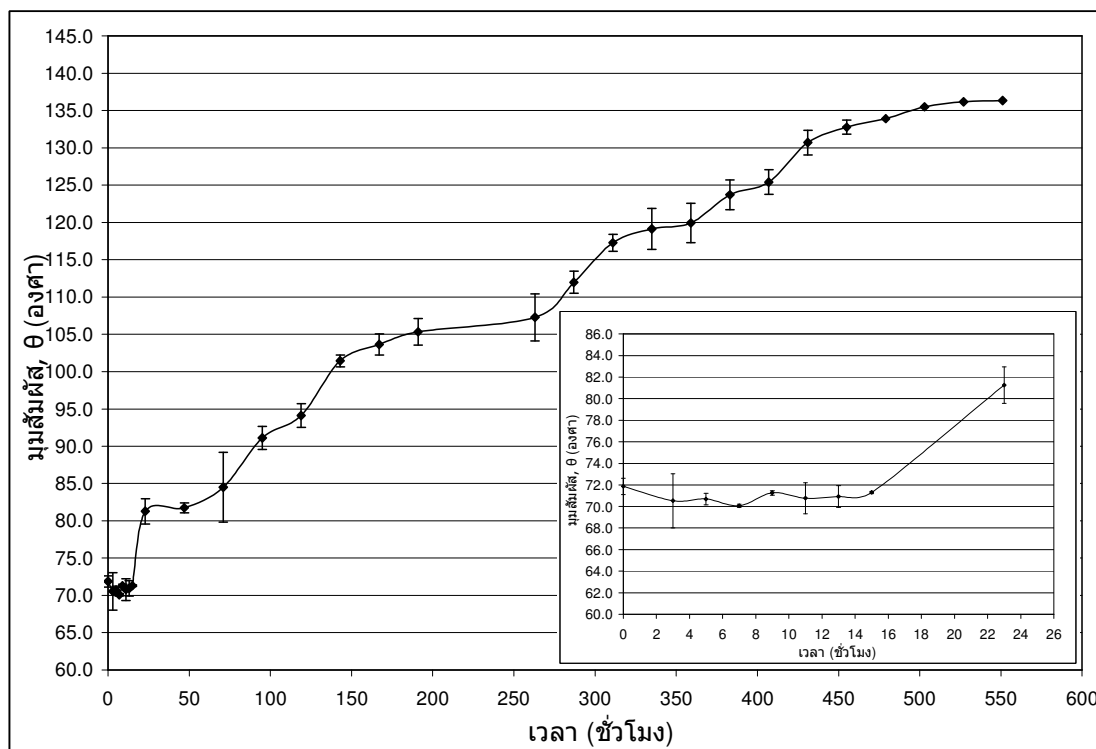


ภาพที่ 41 มุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นคอปเปอร์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE



ภาพที่ 42 การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE ความละเอียดของภาพ 0.03 cm/pixel

เมื่อสร้างกราฟระหว่างมูมสัมพัทธ์ของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE เทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 43

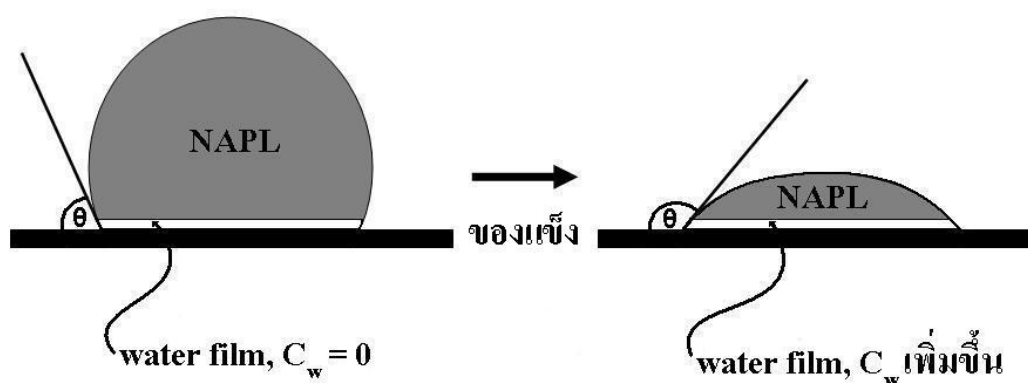


ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างมูมสัมพัทธ์ของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE กับเวลา

จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของมูมในแต่ละเวลาและค่า SD ที่เกิดจากการถ่ายภาพและวัดมูมสัมพัทธ์ในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 43 พบว่ามูมสัมพัทธ์ในช่วงเริ่มต้นมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนถึงเวลา 15 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมูมสัมพัทธ์ 70.9 องศา หลังจากผ่าน 15 ชั่วโมง ไปจนถึงชั่วโมงที่ 503 มูมสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยความชันของกราฟเท่ากับ 0.1 ในขณะที่เวลาผ่านไปมวลของ Toluene ลดลงเนื่องจากการถ่ายเทมวลสาร จนกระทั่งหลังจาก 503 ชั่วโมง มูมสัมพัทธ์ค่อนข้างคงที่ที่มูม 136.3 องศาด้วยความชันเป็นศูนย์ และมวลของ Toluene ลดลงจนเหลือน้อยมาก

ลักษณะกราฟของการทดลองดังแสดงในภาพที่ 43 เห็นได้ว่ามูมสัมพัทธ์ค่อนข้างคงที่เมื่อเริ่มต้นและมีการเปลี่ยนแปลงโดยค่อนข้างคงที่ในภายหลัง หากอธิบายด้วย film theory อาจ

เนื่องจากในตอนเริ่มต้น พื้นผิวของแข็งมีฟิล์มของน้ำ (water film) เคลือบอยู่ซึ่งมีความเข้มข้นของ NAPL เป็นศูนย์ และเมื่อเวลาผ่านไปการละลายมีผลทำให้ NAPL เข้าไปแทรกตัวอยู่ในน้ำ ทำให้ค่าความเข้มข้นของ solute NAPL ในน้ำบริเวณ water film (C_w) มากขึ้น และ adhesive force ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของของเหลวกับของแข็ง มีมากกว่า cohesive force ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของของเหลวด้วยกัน ดังนั้น NAPL จึงแผ่บนผิวของแข็งได้มากขึ้น แสดงดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็ง

มุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นเป็น advancing angle เทียบได้กับมุมระหว่างที่ NAPL รุกเข้าไปยังโครงข่าย (network) ของดิน เมื่อเวลาผ่านไปมวลของ NAPL ลดลงเนื่องจากเกิดการถ่ายเทมวลไปสู่ น้ำ และอากาศ ซึ่งมุมสัมผัสในขณะที่ยังมีมวลของ NAPL ลดลงนี้เป็น receding angle เทียบกับมุมระหว่างที่ NAPL ถอยออกจากโครงข่ายของดิน มวล NAPL ลดลงโดยที่ฐานของของเหลวที่แผ่บนของแข็งเท่าเดิม แต่มวลของ NAPL ลดลง จึงทำให้มุมสัมผัสมากขึ้น

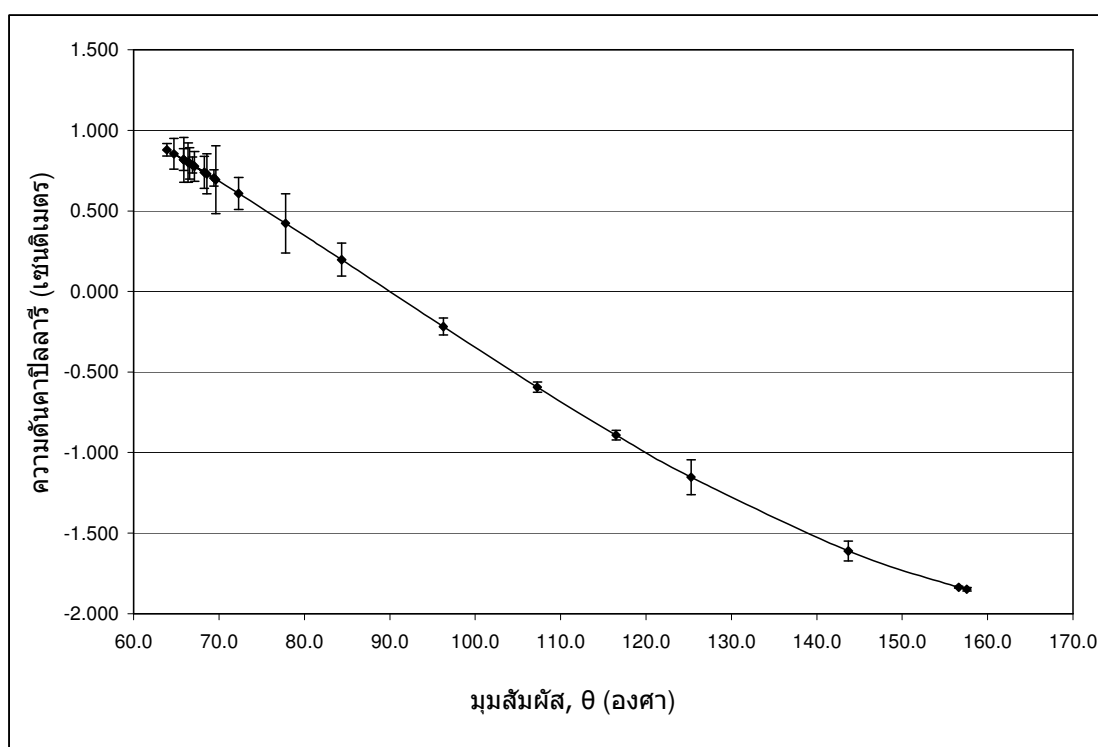
ตารางที่ 8 มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing angle) และมุมสัมผัสสุดท้าย (receding angle) ของการทดลองวัดมุมสัมผัส NAPL บนของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยของเหลวอีกชนิด

ระบบ	มุมสัมผัส เริ่มต้น (advancing angle), องศา	มุมสัมผัส สุดท้าย (receding angle), องศา
หยด TCE บนแผ่นซิลิคอน ล้อมรอบด้วยน้ำ	63.9	157.6
หยด TCE บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยน้ำ	45.7	162.0
หยด TCE บนแผ่นซิลิคอน ล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene	71.2	159.2
หยด TCE บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยสารละลาย Toluene	66.3	150.7
หยด Toluene บนแผ่นซิลิคอน ล้อมรอบด้วยน้ำ	55.2	138.5
หยด Toluene บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยน้ำ	50.2	143.2
หยด Toluene บนแผ่นซิลิคอน ล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE	115.4	153.5
หยด Toluene บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE	70.9	136.3

จากตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่าลักษณะการเปียกของพื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์ที่อิมมิดด้วยน้ำ เริ่มต้นเป็นลักษณะ strongly water-wet ซึ่งซิลิคอนและควอตซ์ที่อิมมิดด้วยสารละลาย NAPL เริ่มต้นเป็นลักษณะ intermediate wet เมื่อเวลาผ่านไป ลักษณะการเปียกทั้งสองแบบจะเปลี่ยนเป็น strongly oil-wet ซึ่งมีลักษณะเดียวกันตลอดการทดลอง ซึ่ง Powers and Tamblin (1995) อธิบายถึงลักษณะการเปียกเกิดจากการเกาะติดของ NAPL ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและไม่มีขั้ว การเกาะติดของโมเลกุลเหล่านี้เปลี่ยนพื้นผิวหน้าของแข็งจากชอบน้ำ (hydrophilic) เป็นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ได้

จากการทดลองวัดค่าการละลายน้ำของ NAPL เพื่อนำไปหาเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัส เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง มวลของ NAPL สามารถแทรกตัวอยู่ในน้ำได้จนกระทั่งน้ำมีความเข้มข้นของ NAPL สูงสุด ซึ่งเป็นค่าความสามารถในการละลายในน้ำของ NAPL และเนื่องจากการทดลองวัดมุมสัมผัสมีการถ่ายเทมวลของ NAPL ทำให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นขณะที่มีมวลของ NAPL ลดลง จนกระทั่งเหลือน้อยมาก ซึ่งการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นตลอดการทดลอง ดังนั้นจึงบันทึกภาพมุมสัมผัสที่เปลี่ยนไปจนกระทั่งมวลของ NAPL ลดลงเหลือน้อยมาก

ในพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อนของ NAPL ในน้ำใต้ดิน ซึ่งในชั้นดินไม่อิ่มตัวมีการถ่ายเทมวลของ NAPL ไปสู่น้ำและอากาศ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ NAPL ในน้ำ มุมสัมผัสจึงเปลี่ยน ส่วนในชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ถ้ามีการไหลของน้ำใต้ดินทำให้ความเข้มข้นของ NAPL ในน้ำเปลี่ยน มุมสัมผัสจึงเปลี่ยนด้วยเช่นกัน แต่ถ้าไม่มีการถ่ายเทมวลของ NAPL ในน้ำใต้ดิน ทำให้ความเข้มข้นของ NAPL คงที่ มุมสัมผัสจึงคงที่

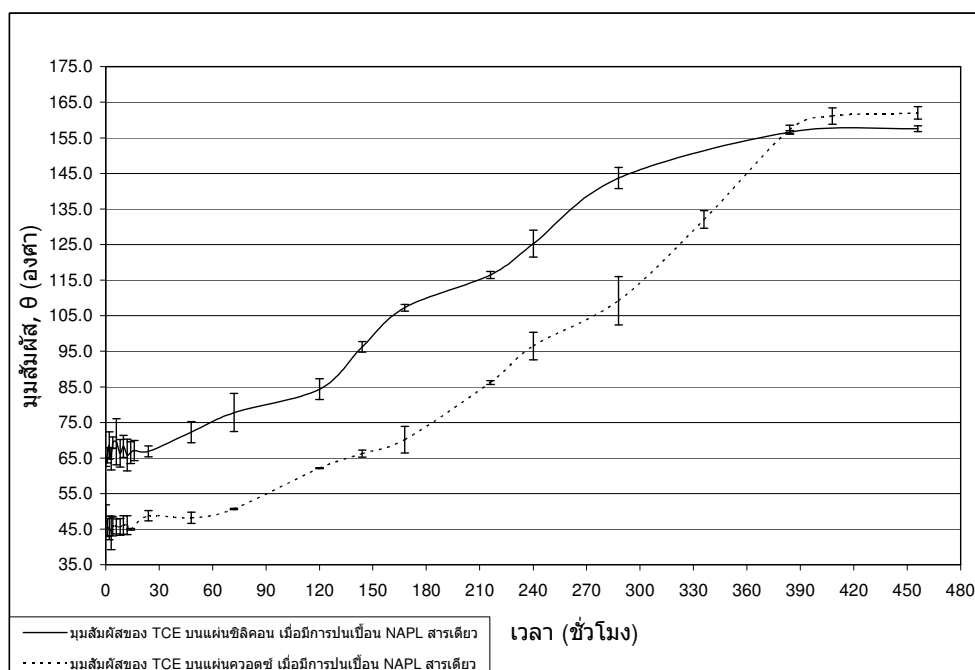


ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

จากภาพที่ 45 แสดงได้จากการลาปลาซในสมการที่ 5 พบว่ามีผลไปทางเดียวกันทั้งการทดลอง ซึ่งความดันคาปิลลารีสัมพันธ์กับมุมสัมผัส ในความสัมพันธ์ของ cosine โดยความดันคาปิลลารีแปรผันตรงกับ cosine ของมุมสัมผัส เมื่อมุมสัมผัสมีค่ามากขึ้นทำให้ cosine มีค่าน้อยลง ความดันคาปิลลารีจึงลดลง จนกระทั่งมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา cosine มีค่าเป็นลบ ทำให้ความดันคาปิลลารีมีค่าเป็นลบ ในช่วงที่ความดันคาปิลลารีเป็นลบ คือความดันขณะที่มวลของ NAPL ลดลง และแผ่ลงบนของแข็งมากขึ้น ซึ่งในพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อน NAPL ในน้ำใต้ดิน เมื่อมี NAPL เกาะติดอยู่ที่อนุภาคของดินและมีการถ่ายเทมวลของ NAPL ในชั้นดินไม่อิ่มตัวและเนื่องจากการ

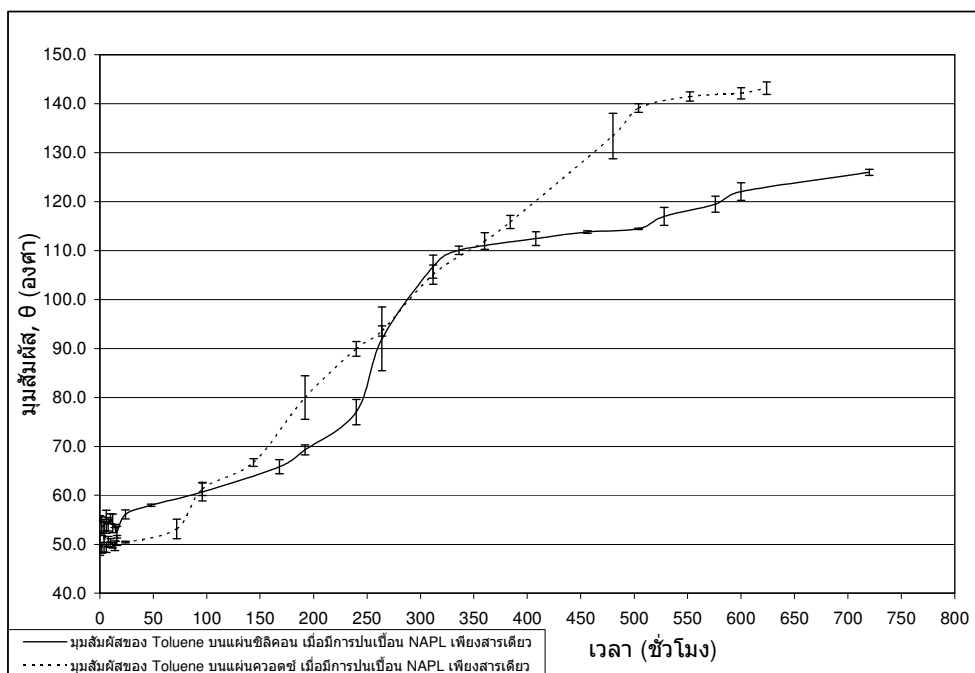
ไหลของน้ำใต้ดินทำให้ NAPL ที่ติดอยู่กับอนุภาคของดินมีมวลลดลง จึงทำให้มุมสัมผัสระหว่าง NAPL กับผิวดินมีค่ามากขึ้น ดังนั้นความดันคาปิลลารีจึงมีค่าลดลง ทำให้น้ำสามารถไหลผ่านช่องว่างของดินได้ง่ายขึ้น และ NAPL ซึ่งติดอยู่ที่ผิวดินถูกชะไปกับน้ำที่ไหลผ่านช่องว่างในดินได้มากขึ้น

10. เปรียบเทียบมุมสัมผัสบนพื้นผิวของซิลิกอนและควอตซ์

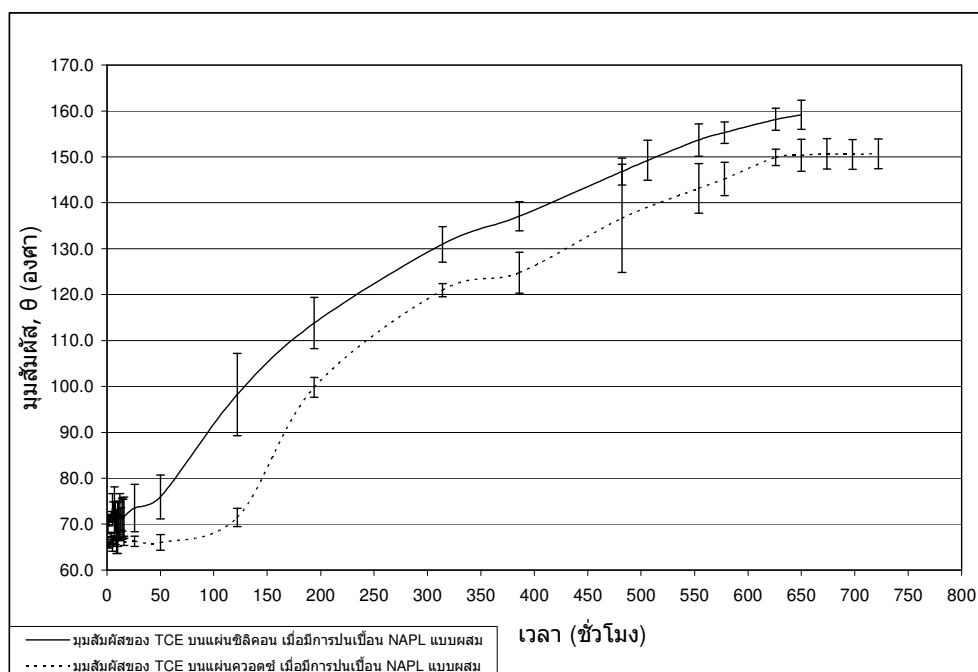


ภาพที่ 46 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอนและควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว

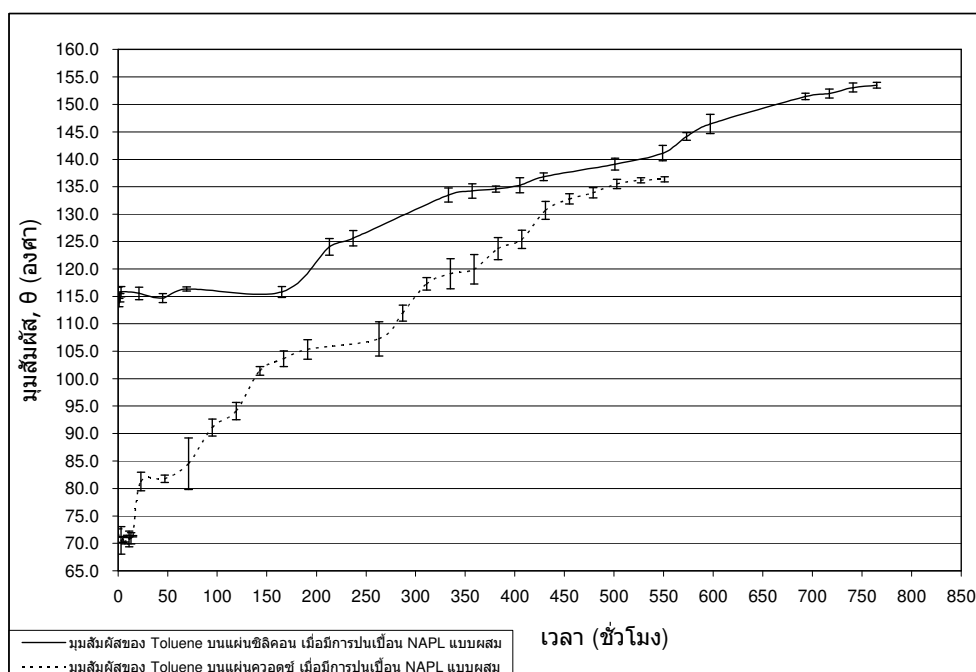
จากการทดลองวัดมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียวและกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม นำมาเปรียบเทียบมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของซิลิกอนกับพื้นผิวของควอตซ์ ซึ่งแสดงภาพการเปรียบเทียบทั้งหมดได้ 4 ภาพ โดยภาพที่ 46 แสดงการเปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิกอนและควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียว และภาพที่ 47 แสดงการเปรียบเทียบมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอนและควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียว



ภาพที่ 47 เปรียบเทียบมวลสะสมของ Toluene บนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว



ภาพที่ 48 เปรียบเทียบมวลสะสมของ TCE บนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม

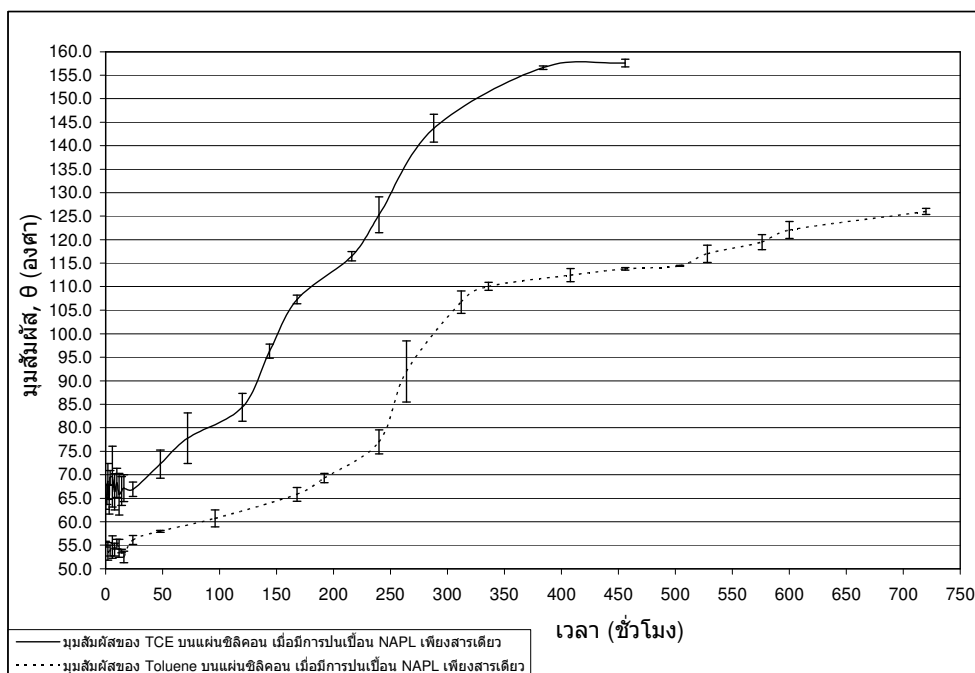


ภาพที่ 49 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอนและควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม

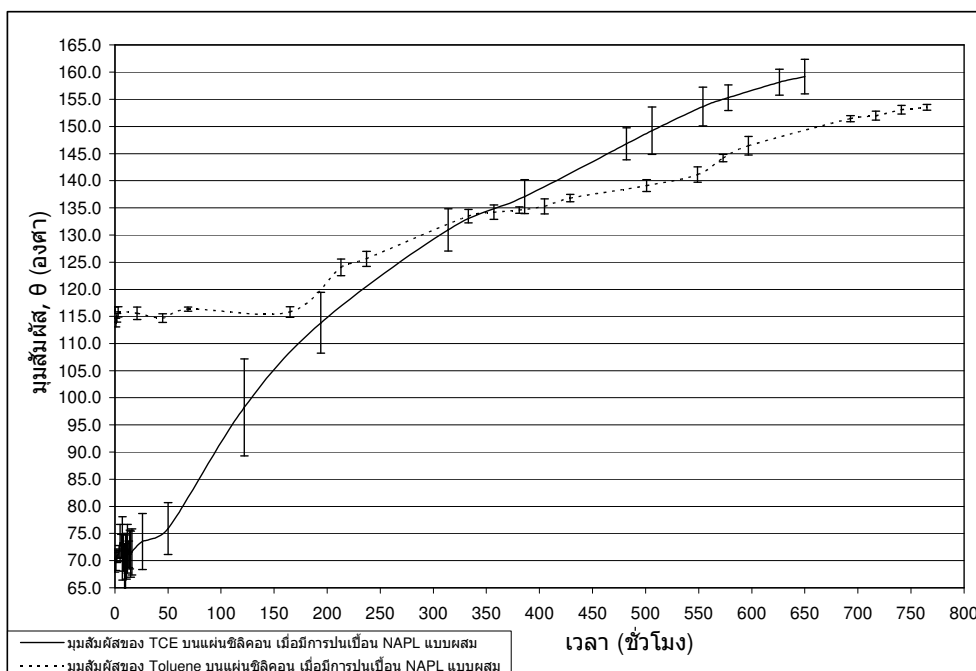
จากการเปรียบเทียบภาพที่ 46 ถึง ภาพที่ 49 สังเกตได้ว่าเมื่อเริ่มต้น พื้นผิวของซิลิกอนมีค่าของมุมสัมผัสมากกว่าเนื่องจาก ควอตซ์มีความเป็น water wetting solid มากกว่าซิลิกอน ซึ่งพบว่าเมื่อผลไปในทางเดียวกันทั้งการปนเปื้อน NAPL อย่างเดียวและปนเปื้อนผสม

11. เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene

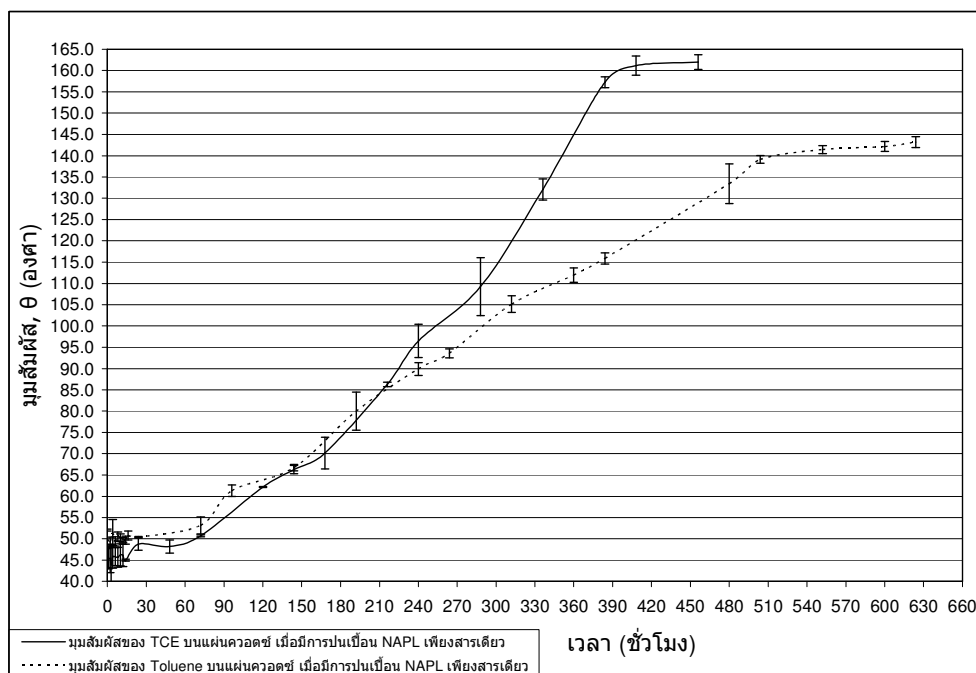
จากการทดลองวัดมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นซิลิกอนและควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียวและกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม นำมาเปรียบเทียบระหว่างมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene ซึ่งแสดงภาพการเปรียบเทียบทั้งหมดได้ 4 ภาพ โดยภาพที่ 50 แสดงการเปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียว และภาพที่ 51 แสดงการเปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม



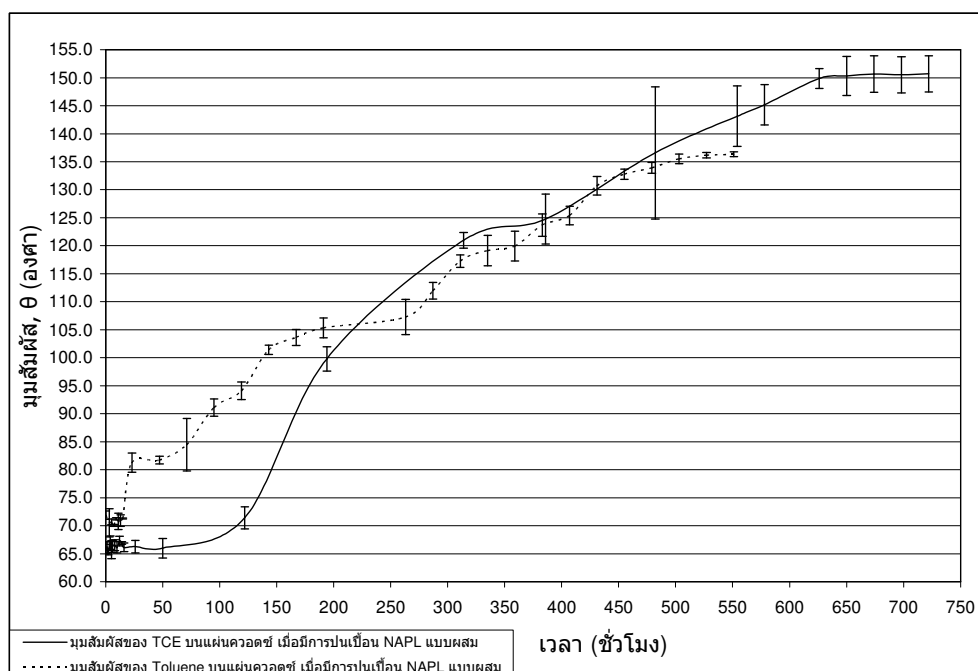
ภาพที่ 50 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นชิลิคอน เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว



ภาพที่ 51 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นชิลิคอน เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม



ภาพที่ 52 เปรียบเทียบมวลสัมพัทธ์ของ TCE และ Toluene บนแผ่นควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว

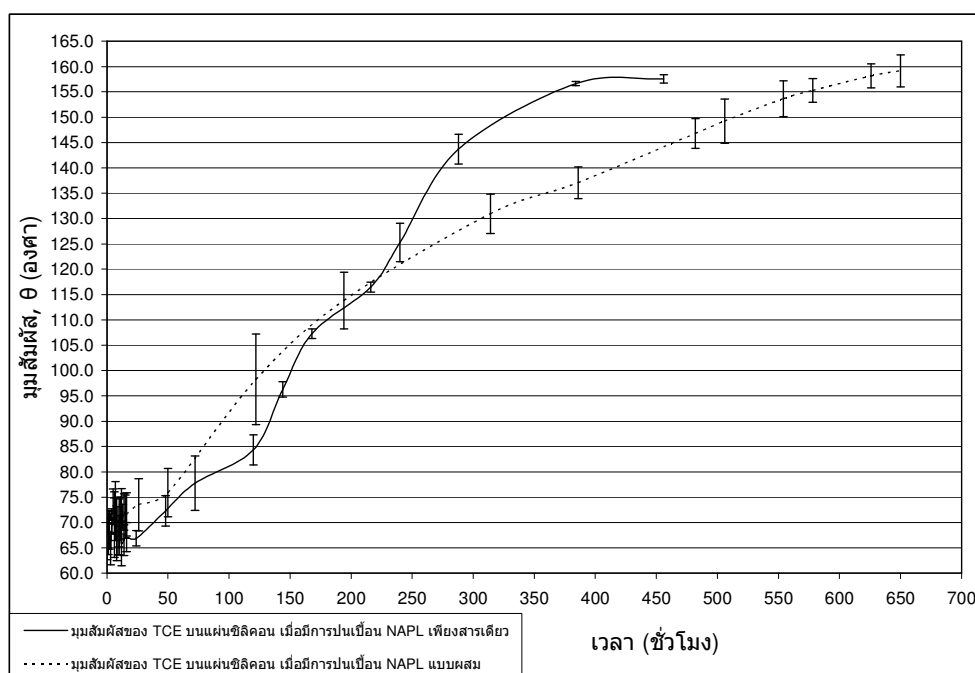


ภาพที่ 53 เปรียบเทียบมวลสัมพัทธ์ของ TCE และ Toluene บนแผ่นควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม

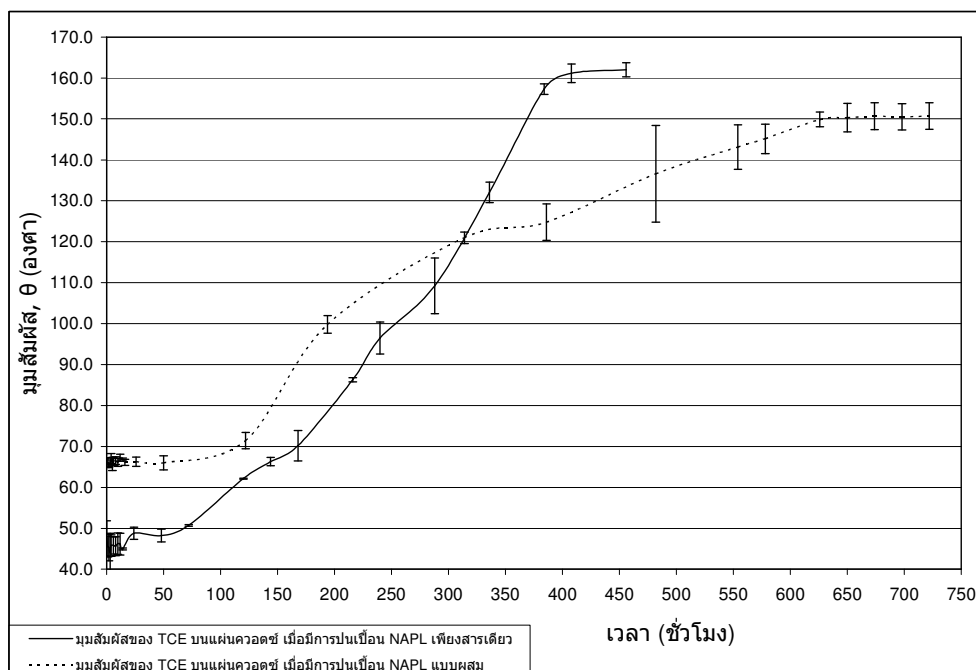
ภาพที่ 52 แสดงการเปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียว และภาพที่ 53 แสดงการเปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE และ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม

จากการเปรียบเทียบมุมสัมผัสของภาพที่ 50 ถึงภาพที่ 53 พบว่ากราฟแสดงมุมสัมผัสของ TCE มีความชันมากกว่า ทำให้การเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสของ TCE เร็วกว่า Toluene เนื่องจาก TCE ละลายในน้ำได้เร็วกว่า Toluene และพบว่าผลไปในทางเดียวกันทั้งการปนเปื้อน NAPL สารเดียว หรือการปนเปื้อน NAPL แบบผสมและของแข็งที่เป็นซิลิคอนหรือควอตซ์

12. เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL สารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม



ภาพที่ 54 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม



ภาพที่ 55 เปรียบเทียบมมสัณคัษของ TCE บนแผ่นควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม

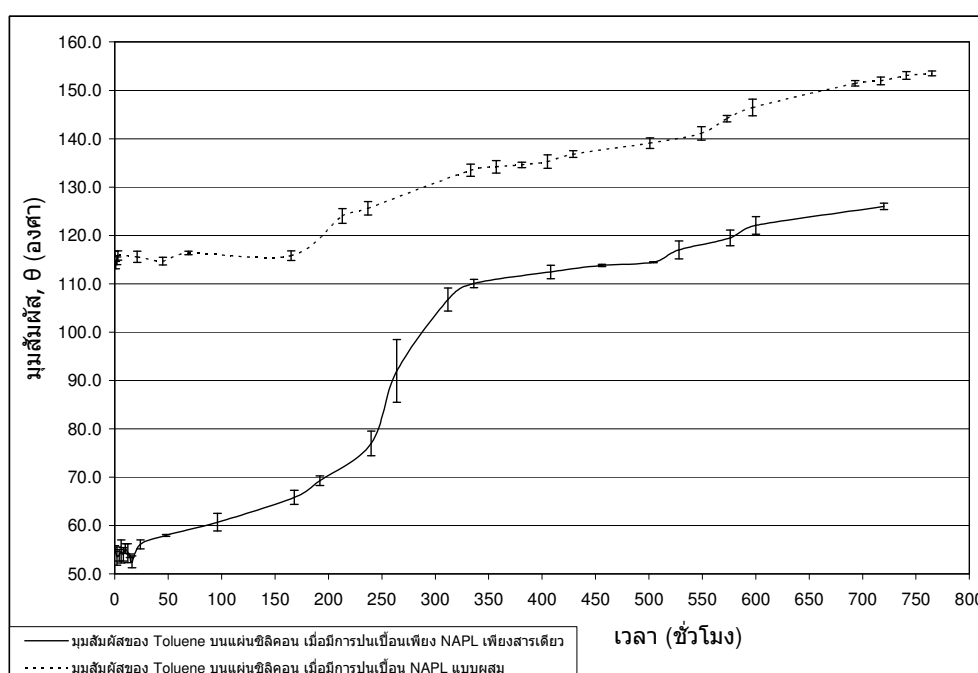
จากการทำการทดลองวัดมมสัณคัษของ TCE บนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียวและกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม นำมาเปรียบเทียบมมสัณคัษของ TCE ทั้ง 2 กรณี ซึ่งแสดงภาพการเปรียบเทียบทั้งหมดได้ 2 ภาพ โดยภาพที่ 54 แสดงการเปรียบเทียบมมสัณคัษของ TCE บนแผ่นซิลิคอน ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม และภาพที่ 55 แสดงการเปรียบเทียบมมสัณคัษของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL สารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม

เมื่อเปรียบเทียบในภาพที่ 54 และ 55 สังเกตได้ว่าในช่วงเริ่มต้น มมสัณคัษของ TCE ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว มีค่าน้อยกว่าการปนเปื้อน NAPLแบบผสม เพราะพื้นผิวของแข็งไม่มีการปนเปื้อน NAPL มาก่อน แต่มมสัณคัษของ TCE ที่มีการปนเปื้อนสารเดียวมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่มมสัณคัษเพิ่มขึ้นเร็วกว่า จากกราฟที่มีความชันมากกว่า แสดงให้เห็นว่า TCE ละลายในน้ำเพียงสารเดียว ละลายได้เร็วกว่าการที่ TCE ละลายร่วมกับ Toluene ในน้ำและพบว่ามีผลในทางเดียวกันทั้งมมสัณคัษของ TCE ที่อยู่บนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์

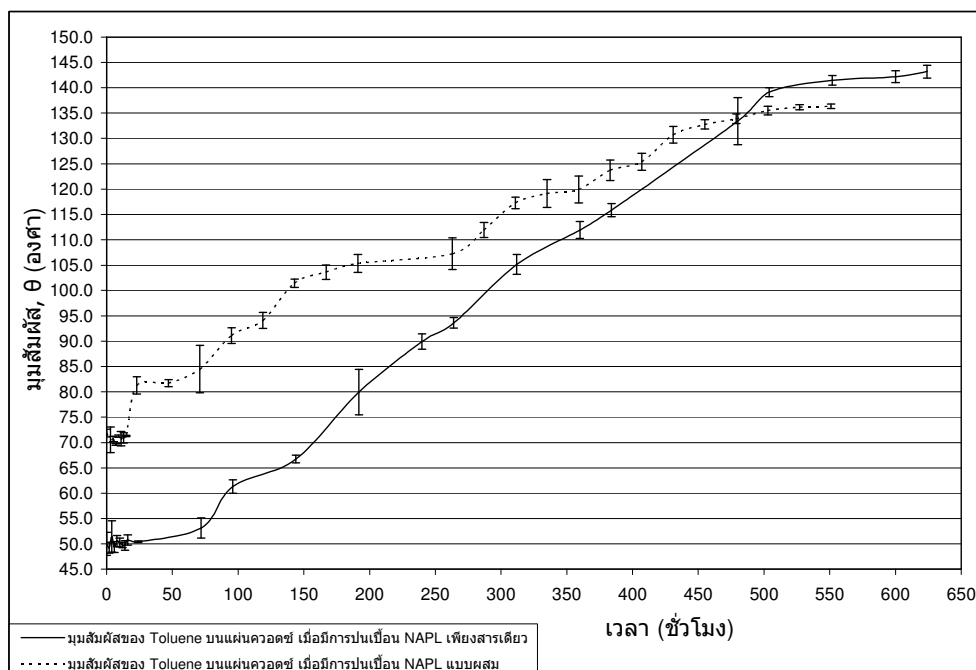
13. เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ Toluene ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL สารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม

จากการทดลองวัดมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอนและควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียวและกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม นำมาเปรียบเทียบมุมสัมผัสของ Toluene ทั้ง 2 กรณี

ซึ่งแสดงภาพการเปรียบเทียบทั้งหมดได้ 2 ภาพ โดยภาพที่ 56 แสดงการเปรียบเทียบมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียว และปนเปื้อน NAPL แบบผสม และภาพที่ 57 แสดงการเปรียบเทียบมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL สารเดียวและปนเปื้อน NAPL แบบผสม



ภาพที่ 56 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิกอน เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว และปนเปื้อน NAPL ผสม



ภาพที่ 57 เปรียบเทียบมมสัณผัสของ Toluene บนแผ่นควอตซ์ เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว และปนเปื้อน NAPL แบบผสม

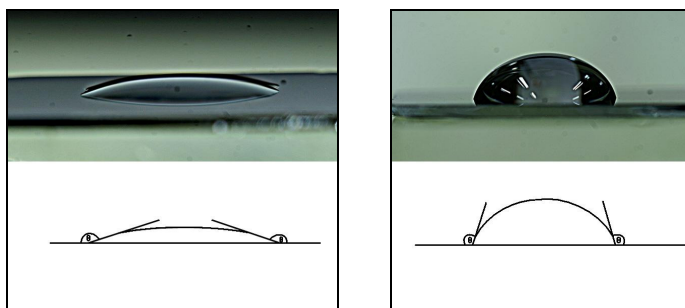
จากการเปรียบเทียบในภาพที่ 56 และ 57 มมสัณผัสของ Toluene บนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว มมสัณผัสมีค่าน้อยกว่าปนเปื้อน NAPL แบบผสม เนื่องจาก ซิลิคอนและควอตซ์ไม่ผ่านการปนเปื้อน NAPL มาก่อนสัมผัสกับ Toluene และลักษณะกราฟมมสัณผัสของ Toluene ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL สารเดียว มีการเปลี่ยนแปลงมมสัณผัสโดยที่มมสัณผัสเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการปนเปื้อน NAPL แบบผสม ด้วยความชันของกราฟที่มากกว่า แสดงให้เห็นว่าการละลายของ Toluene ในน้ำเพียงสารเดียวเร็วกว่าการละลายของ Toluene ร่วมกับ TCE ในน้ำและพบผลไปในทางเดียวกันสำหรับพื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์

ในกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียว เปรียบเทียบกับกรณีที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม มมสัณผัสระหว่าง NAPL กับอนุภาคของดินที่มีการปนเปื้อนผสม มีค่ามากกว่า ทำให้ความดันคาปิลลารีในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินที่มีการปนเปื้อนผสมมีค่าน้อยกว่า และ NAPL แผลงบนผิวดินมาก ดังนั้นในพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม ทำให้น้ำใต้ดินสามารถชะ NAPL ที่ติดอยู่ที่ผิวดินไปได้ง่ายกว่าการปนเปื้อน NAPL เพียงสารเดียว

การทดลองส่วนที่ 3 การวัดมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ เปรียบเทียบ เมื่อของแข็งที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL กับของแข็งที่มีการปนเปื้อน NAPL

1. มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE และที่มีการปนเปื้อน TCE ซึ่ง
ล้อมรอบด้วยอากาศ

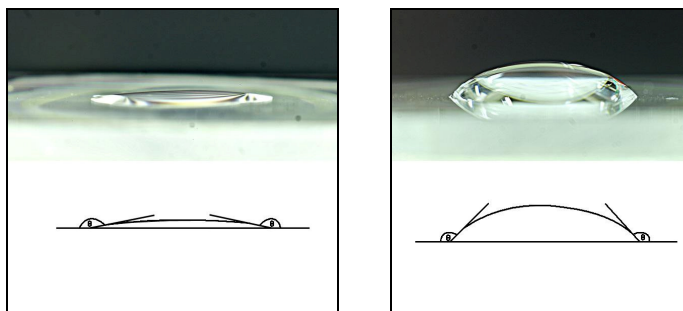
จากการทดลองในสถานะที่ล้อมรอบด้วยอากาศ และวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนระนาบที่อยู่
ระหว่าง 3 สถานะ เมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE และถ่ายภาพมุมสัมผัส
ของน้ำบนแผ่นซิลิคอน ในขณะนั้นเพียงเวลาเดียว นำภาพที่ได้มาวัดมุมสัมผัสดังแสดงในภาพที่ 58
(ซ้าย) ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE เท่ากับ 168.1 องศา และนำ
ซิลิคอนแผ่นเดิมไปแช่ TCE เป็นเวลา 2 วัน และผึ่งให้แห้ง 1 ชั่วโมง เมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นซิลิคอน
ที่มีการปนเปื้อน TCE และถ่ายภาพมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่เกิดขึ้นในขณะนั้นเพียงเวลา
เดียว นำภาพที่ได้มาวัดมุมสัมผัสดังแสดงในภาพที่ 58 (ขวา) ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่
มีการปนเปื้อน TCE เท่ากับ 109.8 องศา



ภาพที่ 58 มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE (ซ้าย) และที่มีการปนเปื้อน
TCE (ขวา) ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

2. มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE และที่มีการปนเปื้อน TCE ซึ่ง
ล้อมรอบด้วยอากาศ

จากการทดลองในสถานะที่ล้อมรอบด้วยอากาศ และวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนระนาบที่อยู่
ระหว่าง 3 สถานะ เมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE และถ่ายภาพมุมสัมผัส
ของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่เกิดขึ้นในขณะนั้นเพียงเวลาเดียว

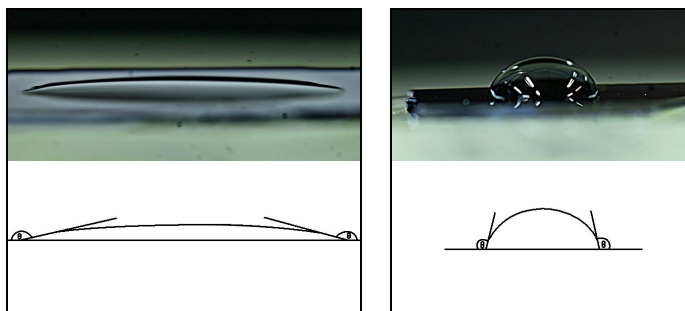


ภาพที่ 59 มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE (ซ้าย) และที่มีการปนเปื้อน TCE (ขวา) ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

นำภาพที่ได้มาวัดมุมสัมผัสดังแสดงในภาพที่ 59 (ซ้าย) ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE เท่ากับ 165.5 องศา และนำควอตซ์แผ่นเดิมไปแช่ TCE เป็นเวลา 2 วัน และผึ่งให้แห้ง 1 ชั่วโมง เมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน TCE และถ่ายภาพมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่เกิดขึ้นในขณะนั้นเพียงเวลาเดียว นำภาพที่ได้มาวัดมุมสัมผัสดังแสดงในภาพที่ 59 (ขวา) ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน TCE เท่ากับ 133.2 องศา

3. มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene และที่มีการปนเปื้อน Toluene ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

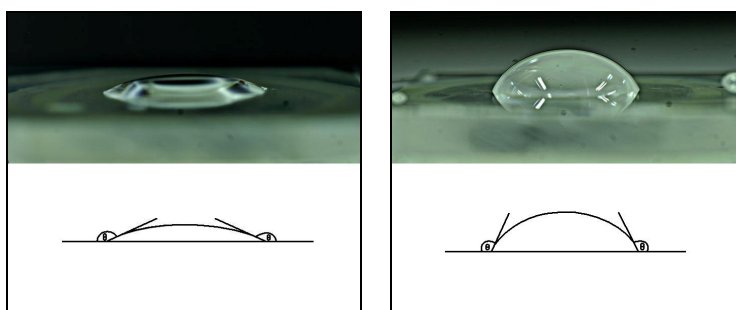
จากการทดลองในสภาวะที่ล้อมรอบด้วยอากาศ และวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนระนาบที่อยู่ระหว่าง 3 สถานะ เมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene และถ่ายภาพมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่เกิดขึ้นในขณะนั้นเพียงเวลาเดียว นำภาพที่ได้มาวัดมุมสัมผัสดังแสดงในภาพที่ 60 (ซ้าย) ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene เท่ากับ 166.6 องศา และนำซิลิคอนแผ่นเดิมไปแช่ Toluene เป็นเวลา 2 วัน และผึ่งให้แห้ง 1 ชั่วโมง เมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นซิลิคอนที่มีการปนเปื้อน Toluene และถ่ายภาพมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่เกิดขึ้นในขณะนั้นเพียงเวลาเดียว นำภาพที่ได้มาวัดมุมสัมผัสดังแสดงในภาพที่ 60 (ขวา) ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนที่มีการปนเปื้อน Toluene เท่ากับ 107.0 องศา



ภาพที่ 60 มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิกอนที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene (ซ้าย) และที่มีการปนเปื้อน Toluene (ขวา) ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

4. มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene และที่มีการปนเปื้อน Toluene ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

จากการทดลองในสภาวะที่ล้อมรอบด้วยอากาศ และวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนระนาบที่อยู่ระหว่าง 3 สถานะ เมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene และถ่ายภาพมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่เกิดขึ้นในขณะนั้นเพียงเวลาเดียว นำภาพที่ได้มาวัดมุมสัมผัสดังแสดงในภาพที่ 61 (ซ้าย) ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene เท่ากับ 155.4 องศา และนำควอตซ์แผ่นเดิมไปแช่ Toluene เป็นเวลา 2 วัน และผึ่งให้แห้ง 1 ชั่วโมง เมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน Toluene และถ่ายภาพมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่เกิดขึ้นในขณะนั้นเพียงเวลาเดียว นำภาพที่ได้มาวัดมุมสัมผัสดังแสดงในภาพที่ 61 (ขวา) ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน Toluene เท่ากับ 115.6 องศา



ภาพที่ 61 มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene (ซ้าย) และที่มีการปนเปื้อน Toluene (ขวา) ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

ซึ่งการทดลองในส่วนที่ 3 การวัดมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ เปรียบเทียบเมื่อของแข็งที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL กับของแข็งที่มีการปนเปื้อน NAPL สามารถแสดงผลการทดลองทั้งหมดได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับของแข็งต่างชนิดกัน ในกรณีที่ของแข็งไม่มีการปนเปื้อน NAPL และของแข็งที่มีการปนเปื้อน NAPL

ของเหลว	พื้นผิวของแข็ง	สถานะล้อมรอบ	มุมสัมผัส (องศา)
น้ำ	ซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE	อากาศ	168.1
น้ำ	ซิลิคอนที่มีการปนเปื้อน TCE	อากาศ	109.8
น้ำ	ซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene	อากาศ	166.6
น้ำ	ซิลิคอนที่มีการปนเปื้อน Toluene	อากาศ	107.0
น้ำ	ควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE	อากาศ	165.5
น้ำ	ควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน TCE	อากาศ	133.2
น้ำ	ควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน Toluene	อากาศ	155.4
น้ำ	ควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน Toluene	อากาศ	115.6

เมื่อหยดน้ำลงไปบนพื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL มีค่ามากกว่ามุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน NAPL คือน้ำสามารถแผ่ลงบนพื้นผิวซิลิคอนและควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อนได้มาก แสดงว่าพื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์นี้มีลักษณะเป็น hydrophilic แต่เนื่องจากมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนมากกว่า ทำให้ซิลิคอนมีความเป็น water wetting solid มากกว่าควอตซ์ และเมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ที่ผ่านการปนเปื้อน NAPL มุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่ามุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่ามุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์เปลี่ยนไป ดังนั้นพื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติได้ โดยที่ซิลิคอนและควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อนซึ่งมีคุณสมบัติของพื้นผิวเป็น hydrophilic เปลี่ยนไปเป็น hydrophobic เนื่องจากการเกาะติดของ NAPL บนพื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์ ทำให้ที่ผิวของซิลิคอนและควอตซ์มีฟิล์ม

ของ NAPL เคลือบอยู่ เมื่อมีน้ำมาเกาะติดที่ผิวนั้น น้ำจึงไม่สามารถแผ่ลงไปในผิวของแข็งได้
มากเท่ากับน้ำที่หยดลงบนผิวซิลิกอนและควอตซ์ที่ไม่มีการเปื้อน NAPL

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัส เมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมจากของเหลวที่ไม่ใช้น้ำ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การละลายร่วมกันของ TCE และ Toluene ในน้ำ ไม่มีผลต่อความสามารถในการละลายของ TCE หรือ Toluene ในน้ำเพียงสารเดียว

2. เมื่อวัดมุมสัมผัสบนระนาบที่อยู่ระหว่างของเหลว-ของแข็ง-ของเหลว (ที่ล้อมรอบ) ควอตซ์มีความเป็น water wetting solid มากกว่าซิลิคอน และเมื่อวัดมุมสัมผัสบนระนาบที่อยู่ระหว่างของเหลว-ของแข็ง-แก๊ส (อากาศที่ล้อมรอบ) ซิลิคอนมีความเป็น water wetting solid มากกว่าควอตซ์ เนื่องจากความเสถียรของกลุ่ม Si-OH ในช่องว่างของอนุภาคของ SiO₂ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ Nakamura *et al.* (2005) ได้อธิบายถึงลักษณะที่เป็น hydrophilic ของพื้นผิวซิลิคอน

3. ลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์สามารถเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติของของเหลวที่มาเกาะติด ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ cohesive force และ adhesive force

4. มุมสัมผัสของ TCE บนพื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์มีการเปลี่ยนแปลงเร็วกว่า Toluene

5. การวัดมุมสัมผัสเมื่อมีการปนเปื้อน NAPL แบบผสมสามารถนำไปช่วยในทางวิศวกรรมในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจริง 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 และพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของ

NAPL ที่เป็นไปได้ รวมถึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนและไม่ให้เกิดการเสียเวลาในการแก้ปัญหาหรือการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน

ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองวัดมลพิษของ TCE ในน้ำ ควรทำการทดลองควบคุมโดยทำการทดลองวัดมลพิษของ TCE ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วย TCE และการทดลองวัดมลพิษของ Toluene ในน้ำ ควรทำการทดลองควบคุมโดยทำการทดลองวัดมลพิษของ Toluene ในสารละลายที่อิ่มตัวด้วย Toluene
2. การทดลองวัดมลพิษของ TCE และ Toluene ในอากาศ ควรวัดมลพิษในตอนเริ่มต้นและเมื่อเวลาผ่านไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุทุมสินโรจน์. 2545. การจัดการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.
2546. ของเสียอันตราย (Hazardous waste). ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.
- เกียรติพงษ์ บุญจิตร. 2550. **Photoshop for photographers**. ครั้งที่ 1. ไอดีซีซี, นนทบุรี.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2541. โครงสร้างและคุณสมบัติของโทลูอีน. แหล่งที่มา: <http://www.udru.ac.th/pasak/toluene.html>, 15 กรกฎาคม 2550.
- คณะอาจารย์ในแผนกวิชาปฐพีวิทยา. 2510. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. แผนกวิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ฉลอง บัวผัน. 2538. น้ำบาดาล. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- วรรณัฐ ศรีพงษ์พิจิตร. 2549. การศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำด้วยวิธีการวิเคราะห์จากภาพดิจิทัล (Investigation of fossil fuel contamination in unsaturated zone using digital image analysis). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิชัย ศรีบุญลือ. 2529. แหล่งน้ำใต้ดินเพื่อการเกษตร (Groundwater Resource for agriculture). ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- วีรณิจ ทรพรานนท์. 2548. **Best guide of digital camera**. ครั้งที่ 1. ชัคเชส มีเดีย, กรุงเทพฯ.
- วีรานุช หลาง. 2551. จุลชีววิทยาสังแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- ศุภวัฒน์ ชัยเกษม. 2551. การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยระบบกรองชีวภาพ (**Removal of VOCs from wastewater using biofiltration**). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศุภสิทธิ์ นาคเสน. 2546. กล้องดิจิตอลฉบับสมบูรณ์. ครั้งที่ 1. อินโฟเพรส, นนทบุรี.
- ไสว พงษ์สุวรรณ. 2531. น้ำใต้ดิน (**Groundwater**). ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ศิริพรรณ สารินทร์. 2550. จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม **Environmental Microbiology**. คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, กรุงเทพฯ.
- อรวิทย์ เมฆพริณ. 2549. **108** เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล. โปรวิชั่น, กรุงเทพฯ.
- Adamson, A.W. and A.P. Gast. 1997. **Physical Chemistry of surfaces**. 6 ed. John Wiley & Sons, Inc, Canada.
- Amirfazli, A., D. Chatain and A.W. Neumann. 1998. Drop size dependence of contact angles for liquid tin on silica surface: line tension and its correlation with solid-liquid interfacial tension. **Colloids and Surfaces** (142): 183-188.
- Bikerman, J.J. 1970. **Physical Surfaces**. Academic press, New York.
- Bowles, J.E. 1970. **Engineering properties of soils and their measurement**. McGrawHill, USA.
- Chomsurin, C. 2003. **Analysis of pore-scale nonaqueous phase liquid dissolution in etched silicon pore network**. Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana Champaign.

- Freeze, R.A. and J.A. Cherry. 1979. **Groundwater**. Prentice hall, New Jersey, USA.
- Gould, R.F. 1964. **Contact angle, wettability and adhesion**. American chemical society, USA.
- LaGrega, M.D., P.L. Buckingham and J.C. Evans. 2001. **Hazardous waste management**. 2 ed. McGraw-Hill, New York.
- Lee, K.Y. and C.A. Peters. 2004. UNIFAC modeling of cosolvent phase partitioning in nonaqueous phase liquid-water systems. **Journal of environmental engineering** (140): 478-483.
- Kazayawoko, M., A.W. Neumann and J.J. Balatinez. 1997. Estimating the wettability of wood by the axisymmetric drop shape analysis-contact diameter method. **Wood science and technology** (31): 87-95.
- 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.
- Nakamura, M., M. Kobayashi, N. Kuzuya, T. Komatsu and T. Mochizuka. 2005. Hydrophilic property of SiO₂/TiO₂ double layer films. **Thin solid films** (302): 121-124.
- Pankow, J.F. and J.A. Cherry. 1996. **Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater: History, behavior and remediation**. Waterloo Press, USA.
- Powers, S.E. and M.E. Tamblin. 1995. Wettability of porous media after exposure to synthetic gasolines. **Journal of contaminant hydrology** (19): 105-125.
- Tadmor, R. and P.S. Yadav. 2007. As-placed contact angles for sessile drops. **Journal of colloid and interface science** (317): 241-246.

- Song, W., J. Zhang, Y. Xie, Q. Cong and B. Zhao. 2008. Large-area unmodified superhydrophobic copper substrate can be prepared by an electroless replacement deposition. **Journal of colloid and interface science** (329): 208-211.
- Bengtsson, S. and P. Amirfeiz. 2000. Room temperature wafer bonding of silicon, oxidized silicon, and crystalline quartz. **Journal of electronic materials** 29 (7): 909-915.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
กราฟมาตรฐานและการคำนวณ

กราฟมาตรฐานและตัวอย่างการคำนวณ

1. กราฟมาตรฐาน TCE

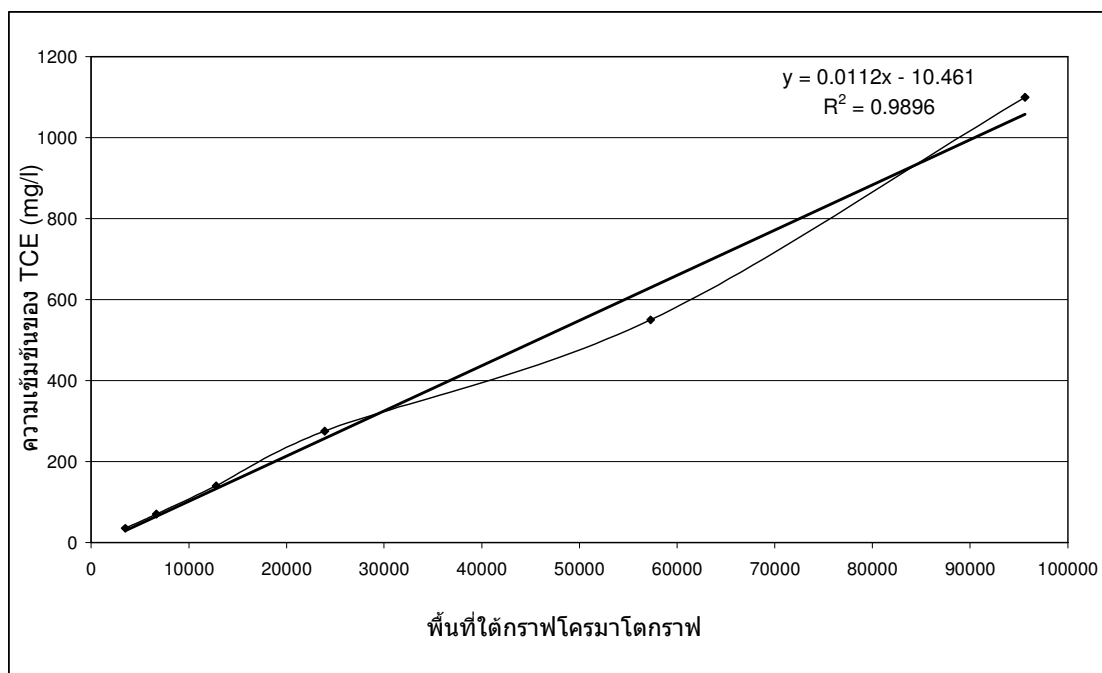
1.1 การเตรียม Standard Curve ของ TCE ในน้ำ

เตรียม TCE ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC) ซึ่งค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ได้ แสดงดังตารางผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ความเข้มข้น TCE ต่าง ๆ

ความเข้มข้น TCE (mg/L)	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area)
0	0
35	3,486.5
70	6,611.1
140	12,781.9
275	23,910.4
550	47,286.8
1,100	95,612.4

นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้น TCE (mg/L) กับ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์และใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการหาปริมาณ TCE ในตัวอย่างอื่น ๆ ต่อไป



ภาพผนวกที่ ก1 กราฟมาตรฐาน TCE

สมการ $y = 0.0112x - 10.461$, $R^2 = 0.9896$

โดยที่ $y =$ ความเข้มข้น TCE (mg/L)

$x =$ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณ TCE

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของ TCE ในน้ำ ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area)
1	98,260.3
2	97,055.3
...	...

สมการ $y = 0.0112x - 10.461$

ตัวอย่างที่ 1

แทนค่า $y = 0.0112(98,260.3) - 10.461$

$y = 1,090.1 \text{ mg/L}$

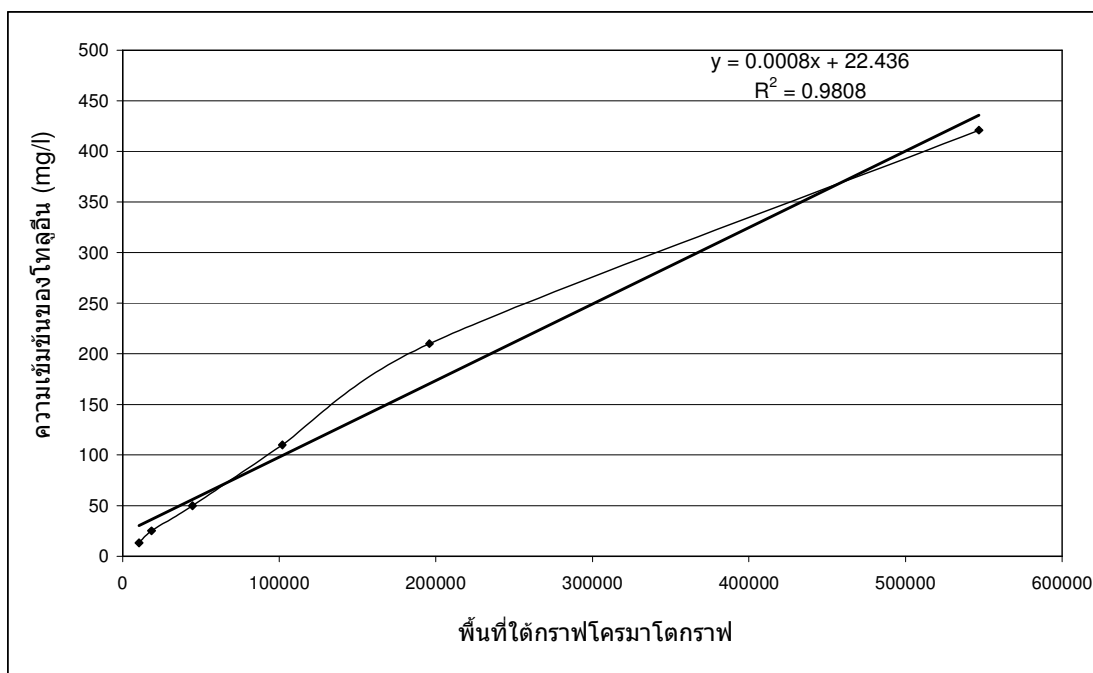
1.2 การเตรียม Standard Curve ของ Toluene ในน้ำ

เตรียม Toluene ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC) ซึ่งค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ได้ แสดงดังตารางผนวกที่ ก3

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ความเข้มข้น Toluene ต่าง ๆ

ความเข้มข้น Toluene (mg/L)	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area)
0	0
13	10,431.5
25	18,563.7
50	44,695.8
110	102,000.8
210	19,6030.9
421	54,6921.3

นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้น Toluene (mg/L) กับ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์และใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการหาปริมาณ Toluene ในตัวอย่างอื่น ๆ ต่อไป



ภาพผนวกที่ ก2 กราฟมาตรฐาน Toluene

สมการ $y = 0.0008x + 22.436$, $R^2 = 0.9808$

โดยที่ y = ความเข้มข้น Toluene (mg/L)

x = ค่าพื้นที่ใต้กราฟ

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณ Toluene

ตารางผนวกที่ ก4 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของ Toluene ในน้ำ ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area)
1	511,845.2
2	544,041.2
...	...

สมการ $y = 0.0008x + 22.436$

ตัวอย่างที่ 1

แทนค่า $y = 0.0008(511,845.2) + 22.436$

$$y = 431.9 \text{ mg/L}$$

ตัวอย่างรายการคำนวณ

1. การเตรียมสารละลาย TCE ในการทดลองการวัดมุมสัมผัส

TCE (C_2HCl_3)

Pankow (1995) Molecular weight (MW) = 131.5 g/mol

Density = 1.46 g/cm³

Solubility = 1,100 mg/L

% purity = 99.5%

จาก

$$N_1V_1 = N_2V_2$$

$$N_2 = \frac{\% \text{ purity} \times 10 \times \text{density}}{MW}$$

$$N_2 = \frac{99.5 \times 10 \times 1.46 \text{ g/cm}^3}{131.5 \text{ g/mol}}$$

$$N_2 = 11,047.15 \text{ mol/L}$$

แทนค่า N_2 ในสมการ $N_1V_1 = N_2V_2$

$$V_2 = \frac{N_1 V_1}{N_2}$$

$$V_2 = \frac{1,100 \text{ mg/L} \times 1,000 \text{ mL}}{11,407.15 \text{ mol/L}}$$

$$V_2 = 0.000757 \text{ mL}$$

ดังนั้น ต้องเตรียม TCE ให้มีปริมาตรมากกว่า 0.000757 mL ในน้ำปริมาตร 1,000 mL

2. การเตรียมสารละลาย Toluene ในการทดลองวัดมุมสัมผัส

Toluene (C_7H_8)

LaGrega (2001) Molecular weight (MW) = 92.14 g/mol

Density = 0.87 g/cm³

Solubility = 421 mg/L

% purity = 99.5%

จาก

$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

$$N_2 = \frac{\% \text{ purity} \times 10 \times \text{density}}{\text{MW}}$$

$$N_2 = \frac{99.5 \times 10 \times 0.87 \text{ g/cm}^3}{92.14 \text{ g/mol}}$$

$$N_2 = 9,395 \text{ mol/L}$$

แทนค่า N_2 ในสมการ $N_1 V_1 = N_2 V_2$

$$V_2 = \frac{N_1 V_1}{N_2}$$

$$V_2 = \frac{421 \text{ mg/L} \times 1,000 \text{ mL}}{9,395 \text{ mol/L}}$$

$$V_2 = 0.000486 \text{ mL}$$

ดังนั้น ต้องเตรียม Toluene ให้มีปริมาตรมากกว่า 0.000486 mL ในน้ำปริมาตร 1,000 mL

ภาคผนวก ข
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าการละลายน้ำของ TCE

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ใต้กราฟโครมาโตกราฟ	ความเข้มข้น TCE ในน้ำ (mg/L)
0	0	0
1	98,794.4	1,096.0
2	97,055.3	1,076.6
3	109,725.8	1,218.5
4	98,486.6	1,092.6
5	105,394.8	1,170.0
6	106,519.1	1,182.6
7	98,575.5	1,093.6
8	101,750.7	1,129.1
9	99,770.5	1,107.0
10	91,656.6	1,016.1
11	121,026.9	1,345.0
12	95,991.0	1,064.6
13	100,636.1	1,116.7
14	91,507.6	1,014.4
15	102,233.8	1,134.6
16	95,330.2	1,057.2
17	111,367.2	1,236.9
18	99,236.7	1,101.0
19	100,545.8	1,115.7
20	95,726.9	1,061.7
21	96,211.3	1,067.1
22	95,472.7	1,058.8
23	97,493.7	1,081.5
24	94,399.8	1,046.8

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าการละลายน้ำของ Toluene

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ใต้กราฟโครมาโตกราฟ	ความเข้มข้น Toluene ในน้ำ (mg/L)
0	0	0
1	517,522.3	436.5
2	548,541.5	461.3
3	424,414.2	362.0
4	653,515.7	545.2
5	634,277.2	529.9
6	472,255.4	400.2
7	561,082.1	471.3
8	555,968.2	467.2
9	497,854.1	420.7
10	481,458.7	407.6
11	203,823.9	185.5
12	851,796.7	703.9
13	559,047.6	469.7
14	408,015.2	348.8
15	425,462.4	362.8
16	582,308.5	488.3
17	613,002.6	512.8
18	525,917.0	443.2
19	251,271.1	223.5
20	724,825.2	602.3
21	315,226.4	274.6
22	474,210.8	401.8
23	635,406.4	530.8
24	458,544.9	389.3

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าการละลายน้ำของ TCE ผสม Toluene

เวลา (ชั่วโมง)	TCE		Toluene	
	พื้นที่ใต้กราฟ	ความเข้มข้น (mg/L)	พื้นที่ใต้กราฟ	ความเข้มข้น (mg/L)
0	0	0	0	0
1	98,280.8	1,090.3	528,360.0	445.1
2	101,699.8	1,128.6	469,020.2	397.7
3	99,045.9	1,098.9	699,062.9	581.7
4	93,751.1	1,039.6	567,696.8	476.6
5	99,107.8	1,099.5	429,299.9	365.9
6	108,656.9	1,206.5	479,792.1	406.3
7	98,307.1	1,090.6	391,443.8	335.6
8	106,782.6	1,185.5	521,143.9	439.4
9	137,764.6	1,532.5	366,924.7	316.0
10	99,328.4	1,102.0	493,345.2	417.1
11	103,824.7	1,152.4	761,362.1	631.5
12	98,678.7	1,094.7	496,026.2	419.3
13	94,369.7	1,046.5	514,979.5	434.4
14	105,028.4	1,165.9	681,340.0	567.5
15	91,989.0	1,019.8	513,537.9	433.3
16	98,547.0	1,093.3	411,738.8	351.8
17	89,429.7	991.2	455,818.9	387.1
18	104,892.6	1,164.3	532,065.9	448.1
19	93,277.8	1,034.2	400,396.2	342.8
20	95,837.6	1,062.9	749,975.3	622.4
21	94,760.0	1,050.9	547,269.7	460.3
22	117,102.1	1,301.1	453,531.0	385.3
23	92,733.2	1,028.2	399,035.4	341.7
24	93,746.6	1,039.5	582,315.9	488.3

ตารางผนวกที่ ๔ ผลการทดลองมุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นซิลิคอน ล้อมรอบด้วยน้ำ

เวลา (ชั่วโมง)	มุมสัมผัส (θ)	$\cos \theta$	capillary pressure
0	63.9	0.440	0.880
1	65.8	0.410	0.819
2	68.6	0.366	0.730
3	64.7	0.427	0.854
4	69.4	0.352	0.705
6	69.6	0.349	0.694
8	66.4	0.401	0.801
10	68.3	0.370	0.740
12	65.9	0.409	0.816
14	66.5	0.398	0.796
16	67.1	0.389	0.777
24	66.9	0.393	0.785
48	72.3	0.304	0.608
72	77.8	0.212	0.423
120	84.4	0.098	0.197
144	96.3	-0.109	-0.128
168	107.3	-0.297	-0.594
216	116.5	-0.446	-0.892
240	125.3	-0.577	-1.153
288	143.7	-0.806	-1.610
384	156.6	-0.918	-1.836
456	157.6	-0.924	-1.849

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทดลองมุมสัมผัสระหว่าง TCE บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยน้ำ

เวลา (ชั่วโมง)	มุมสัมผัส (θ)	$\cos \theta$	capillary pressure
0	47.6	0.675	1.347
1	45.5	0.701	1.401
2	45.3	0.703	1.405
3	44.0	0.719	1.435
4	45.8	0.697	1.394
6	45.8	0.697	1.393
8	45.6	0.699	1.398
10	46.2	0.692	1.382
12	46.1	0.693	1.385
14	45.0	0.707	1.365
24	48.8	0.659	1.318
48	48.2	0.666	1.332
72	50.7	0.633	1.266
120	62.2	0.467	0.934
144	66.3	0.402	0.805
168	70.2	0.339	0.678
216	86.3	0.065	0.130
240	96.5	-0.113	-0.225
288	109.2	-0.329	-0.656
336	132.1	-0.670	-1.339
384	157.3	-0.922	-1.845
408	161.2	-0.946	-1.892
456	162.0	-0.951	-1.902

ตารางผนวกที่ ๖6 ผลการทดลองมุมสัมผัสระหว่าง TCE บนแผ่นซิลิกอน ล้อมรอบด้วย
สารละลาย Toluene

เวลา (ชั่วโมง)	มุมสัมผัส (θ)	$\cos \theta$	capillary pressure
0	69.7	0.347	0.694
1	70.0	0.342	0.684
2	70.9	0.328	0.655
4	71.7	0.314	0.628
6	72.7	0.298	0.596
8	71.4	0.318	0.636
10	69.2	0.355	0.709
11	70.8	0.329	0.656
12	72.2	0.306	0.610
13	71.2	0.323	0.646
14	72.1	0.308	0.615
15	71.2	0.323	0.644
16	71.6	0.315	0.630
26	73.5	0.284	0.566
50	75.9	0.243	0.486
122	98.2	-0.143	-0.284
194	113.8	-0.404	-0.805
314	130.9	-0.655	-1.309
386	137.1	-0.732	-1.463
482	146.8	-0.837	-1.672
506	149.2	-0.859	-1.715
554	153.7	-0.896	-1.790
578	155.3	-0.908	-1.816
626	158.2	-0.928	-1.855
650	159.2	-0.935	-1.867

ตารางผนวกที่ ข7 ผลการทดลองมุมสัมผัสระหว่าง TCE บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วย
สารละลาย Toluene

เวลา (ชั่วโมง)	มุมสัมผัส (θ)	$\cos \theta$	capillary pressure
0	66.1	0.405	0.810
1	66.2	0.404	0.808
2	65.3	0.417	0.835
4	67.0	0.391	0.781
5	65.7	0.411	0.822
8	66.5	0.398	0.796
10	66.1	0.405	0.809
12	67.3	0.386	0.773
14	66.9	0.392	0.784
16	66.1	0.405	0.809
26	66.3	0.402	0.805
50	66.0	0.407	0.813
122	71.4	0.318	0.637
194	99.8	-0.170	-0.340
314	121.0	-0.515	-1.029
386	124.8	-0.570	-1.138
482	136.6	-0.727	-1.433
554	143.1	-0.800	-1.595
578	145.2	-0.821	-1.639
626	149.9	-0.865	-1.729
650	150.3	-0.869	-1.736
674	150.7	-0.872	-1.742
698	150.5	-0.871	-1.739
722	150.7	-0.872	-1.742

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการทดลองมุมสัมผัสระหว่าง Toluene บนแผ่นซิลิกอน ล้อมรอบด้วยน้ำ

เวลา (ชั่วโมง)	มุมสัมผัส (θ)	$\cos \theta$	capillary pressure
0	55.3	0.570	1.140
2	53.7	0.592	1.184
4	53.9	0.590	1.179
6	54.6	0.579	1.157
8	54.1	0.587	1.173
10	55.2	0.570	1.140
12	54.3	0.584	1.167
14	53.8	0.591	1.182
16	52.5	0.609	1.217
24	56.1	0.558	1.115
48	58.0	0.530	1.060
96	60.7	0.489	0.978
168	65.8	0.409	0.819
192	69.3	0.353	0.707
240	77.0	0.225	0.450
264	92.0	-0.034	-0.068
312	106.7	-0.288	-0.567
336	110.1	-0.343	-0.686
408	112.5	-0.382	-0.764
456	113.8	-0.404	-0.807
504	114.5	-0.414	-0.828
528	117.0	-0.454	-0.908
576	119.5	-0.492	-0.984
600	122.1	-0.531	-1.061
720	126.0	-0.588	-1.176

ตารางผนวกที่ ข9 ผลการทดลองมุมสัมผัสระหว่าง Toluene บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยน้ำ

เวลา (ชั่วโมง)	มุมสัมผัส (θ)	$\cos \theta$	capillary pressure
0	50.0	0.643	1.333
2	49.3	0.653	1.305
4	51.5	0.623	1.223
6	49.4	0.651	1.301
8	50.6	0.635	1.220
10	50.3	0.639	1.240
12	49.8	0.645	1.251
14	49.7	0.647	1.213
16	50.8	0.632	1.198
24	50.4	0.637	1.195
72	53.2	0.600	1.161
96	61.3	0.480	0.960
144	66.8	0.395	0.789
192	80.0	0.174	0.348
240	89.9	0.001	0.003
264	93.6	-0.063	-0.126
312	105.1	-0.261	-0.521
360	111.9	-0.374	-0.747
384	115.9	-0.436	-0.872
480	133.4	-0.687	-1.372
504	139.1	-0.756	-1.531
552	141.5	-0.782	-1.564
600	142.2	-0.790	-1.579
624	143.2	-0.801	-1.601

ตารางผนวกที่ ข10 ผลการทดลองมุมสัมผัสระหว่าง Toluene บนแผ่นซิลิกอน ล้อมรอบด้วย
สารละลาย TCE

เวลา (ชั่วโมง)	มุมสัมผัส (θ)	$\cos \theta$	capillary pressure
0	116.3	-0.443	-0.885
1	113.9	-0.405	-0.809
2	114.8	-0.419	-0.837
3	115.9	-0.436	-0.872
21	115.6	-0.432	-0.863
45	114.7	-0.418	-0.835
69	116.4	-0.444	-0.888
165	115.8	-0.435	-0.871
213	124.0	-0.560	-1.119
237	125.6	-0.582	-1.164
333	133.5	-0.688	-1.376
357	134.2	-0.697	-1.394
381	134.6	-0.702	-1.404
405	135.3	-0.710	-1.421
429	136.8	-0.729	-1.458
501	139.1	-0.756	-1.512
549	141.1	-0.778	-1.556
573	144.2	-0.811	-1.621
597	146.4	-0.833	-1.666
693	151.5	-0.878	-1.757
717	152.0	-0.883	-1.765
741	153.1	-0.892	-1.783
765	153.5	-0.895	-1.790

ตารางผนวกที่ ข11 ผลการทดลองมุมสัมผัสระหว่าง Toluene บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วย
สารละลาย TCE

เวลา (ชั่วโมง)	มุมสัมผัส (θ)	$\cos \theta$	capillary pressure
0	71.9	0.311	0.622
3	70.5	0.333	0.666
5	70.7	0.331	0.661
7	70.1	0.341	0.682
9	71.3	0.321	0.642
15	71.3	0.321	0.641
23	81.3	0.152	0.304
47	81.7	0.144	0.288
71	84.5	0.096	0.191
95	91.1	-0.019	-0.038
119	94.1	-0.071	-0.143
143	101.4	-0.198	-0.396
167	103.6	-0.236	-0.471
191	105.3	-0.264	-0.529
263	107.3	-0.297	-0.593
311	117.3	-0.458	-0.916
359	119.9	-0.499	-0.997
383	123.7	-0.555	-1.109
407	125.4	-0.579	-1.158
431	130.7	-0.652	-1.304
455	132.8	-0.679	-1.358
479	133.9	-0.693	-1.387
503	135.5	-0.713	-1.426
527	136.2	-0.721	-1.443
551	136.3	-0.723	-1.447

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	จิรายุ คงสมแก้ว
วัน เดือน ปี ที่เกิด	10 กรกฎาคม 2525
สถานที่เกิด	พระนครศรีอยุธยา
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2550