

บทที่ 3

แบบจำลองกายภาพและแบบจำลองคณิตศาสตร์

โครงการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะชั้นน้ำอิ่มตัวจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองด้วยแบบจำลองกายภาพและการจำลองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์

3.1 แบบจำลองกายภาพ

สำหรับเนื้อหาในส่วนการดำเนินการทดลองด้วยแบบจำลองกายภาพแบ่งออกเป็น 6 ส่วนคือ 1. ลักษณะตัวกลางรูพรุนและการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดลอง 2. คุณสมบัติสารเทอร์เซอร์และสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ 3. เครื่องมือวัดความเข้มข้นเกลือคลอไรด์และความเข้มข้นสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีน 4. อุปกรณ์ทดลอง 5. วิธีทดลอง 6. การพัฒนาวิธีวัดความเข้มข้นของสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนด้วยเครื่องมือยูวี-วิซิเบิล ดังนี้

3.1.1 ลักษณะตัวกลางรูพรุนและการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดลอง

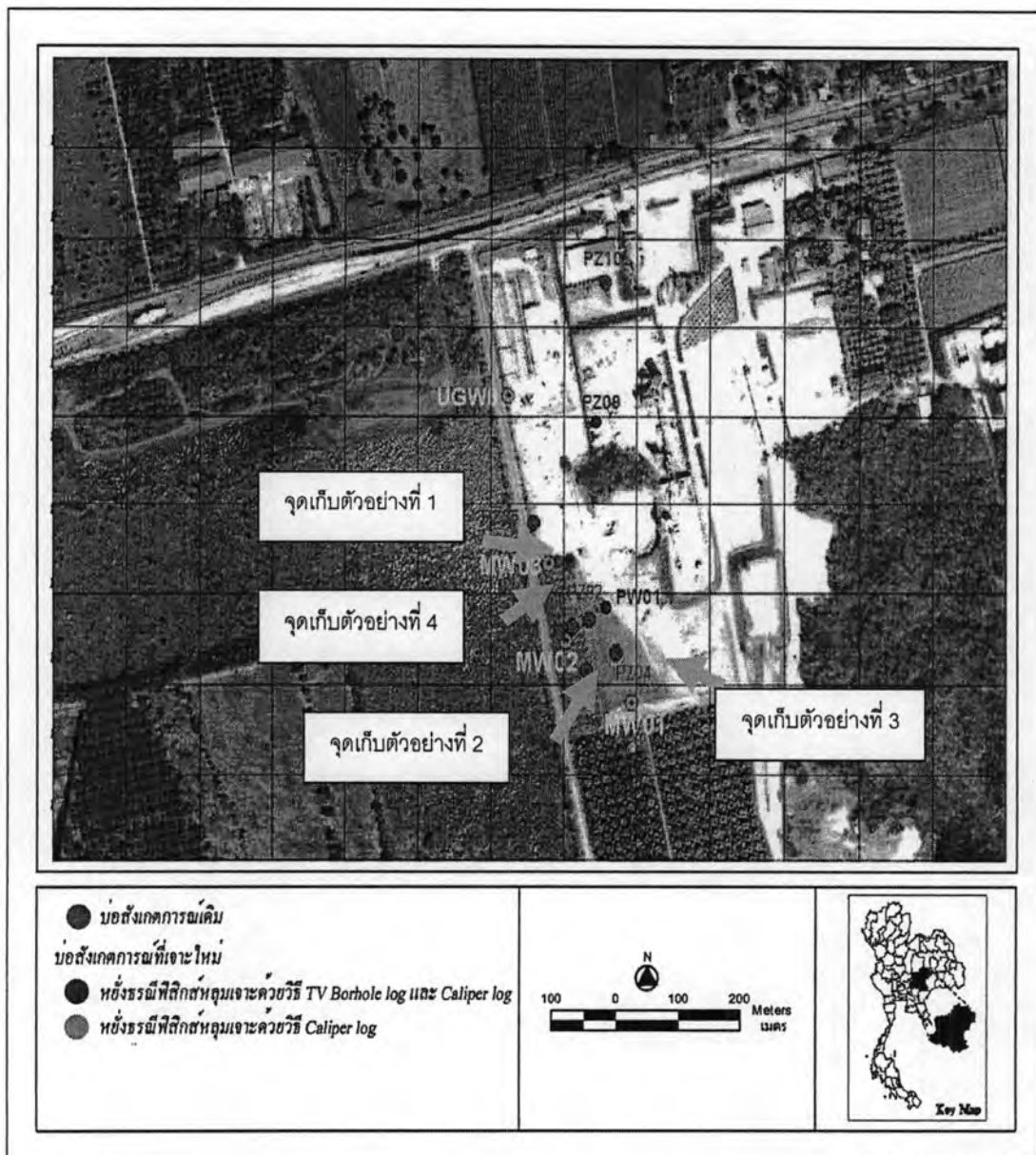
ตัวกลางรูพรุนที่นำมาทดลองเป็นตัวกลางรูพรุนธรรมชาติที่ได้จากพื้นที่ศึกษาแสดงดังรูปที่ 3-1 ตัวอย่างที่นำมาศึกษามีทั้งสิ้น 4 ตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างจะเลือกจากพื้นที่ข้างเคียงพื้นที่ที่ได้รับสารปนเปื้อนเพื่อหลีกเลี่ยงดินที่ถูกปนเปื้อนและเลือกพื้นที่ที่เป็นเส้นทางการไหลของน้ำใต้ดินของพื้นที่ดังกล่าว ดินที่นำมาทดลองจะอยู่ต่ำกว่าระดับพื้นที่ดิน 1-2 เมตร จากนั้นจะนำดินตัวอย่างมาจำแนกด้วยวิธีการหาขนาดคละของเม็ดดิน (Grain-Size Distribution)

การทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน แบ่งออกได้เป็น 3 วิธีตามความเหมาะสมของขนาดเม็ดดิน และตามชนิดของดินคือ

1. วิธีใช้ตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ใช้สำหรับดินที่มีเม็ดหยาบมีขนาดใหญ่กว่า ตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่

2. วิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) สำหรับดินเม็ดละเอียด เช่น ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty Clay) มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่

3. วิธีใช้ตะแกรงร่อนร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Combined Analysis, Sieve and Hydrometer) สำหรับดินที่มีเม็ดดินทั้งขนาดเม็ดใหญ่และเม็ดละเอียดปนกัน เช่น ดินกรวดปนดินเหนียว (Clayey Gravel) ททรายปนดินเหนียว (Clayey Sand) ททรายปนดินตะกอน (Silty Sand) เป็นต้น



รูปที่ 3-1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน

ผลการทดสอบการจำแนกขนาดเม็ดดินพบว่า ดินทุกตัวอย่างข้างตะแกรงเบอร์ 200 เกือบทั้งหมดและมีขนาดคละ ดังตารางที่ 3-1 และรูปที่ 3-2 จากขนาดคละที่ได้สามารถจัดกลุ่มดินทดลองได้ 3 ชุดและหาค่า d_{50} ได้ดังนี้

- ดินทดลองชุดที่ 1 ประกอบด้วยตัวอย่างดินที่ 1 และ 2 มีค่า d_{50} เท่ากับ 0.47 มิลลิเมตร
- ดินทดลองชุดที่ 2 ประกอบด้วยตัวอย่างดินที่ 3 มีค่า d_{50} เท่ากับ 0.70 มิลลิเมตร
- ดินทดลองชุดที่ 3 ประกอบด้วยตัวอย่างดินที่ 4 มีค่า d_{50} เท่ากับ 0.40 มิลลิเมตร

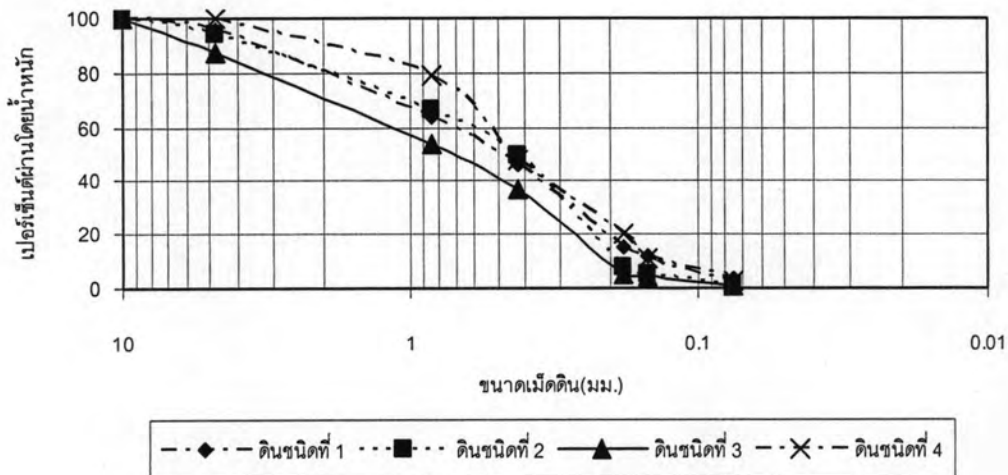
ในการศึกษานี้จะใช้ดินทดลอง 3 ชุดดังกล่าวข้างต้นเป็นตัวแทนของตัวกลางรูพรุนจากพื้นที่ศึกษาในการทดลองโดยที่ดินทดลองชุดที่ 1 ใช้ตัวอย่างดินที่ 1 ในการทดลอง จากการแบ่งชนิดของดินดังตารางที่ 3-2 รูปที่ 3-3 และ รูปที่ 3-4 ดินทดลองทั้ง 3 ชุดเป็นดินประเภทแซนด์โลม (Sandy loam) ลักษณะของดินทดลองทั้ง 3 ชุดแสดงดังรูปที่ 3-5 ถึงรูปที่ 3-7

ตารางที่ 3-1 ขนาดคละของดินชนิดที่ 1-4

ขนาดเม็ดดิน (มม.)	เปอร์เซ็นต์ผ่านโดยน้ำหนัก			
	ดินชนิดที่ 1	ดินชนิดที่ 2	ดินชนิดที่ 3	ดินชนิดที่ 4
10	100.00	100.00	100.00	100.00
4.76	95.54	93.96	87.33	100.00
0.84	64.09	66.47	53.43	78.84
0.42	45.87	49.38	36.96	47.92
0.18	15.23	7.17	4.89	20.42
0.15	11.57	5.28	4.01	10.73
0.075	2.98	0.88	0.75	2.85

ตารางที่ 3-2 ขนาดของดินทดลอง

ดินทดลอง	ดินตัวอย่าง	ชนิดดิน	
		กรวด	ทราย
ดินทดลองชุดที่ 1	ดินตัวอย่างที่ 1	4.5 เปอร์เซ็นต์	95.5 เปอร์เซ็นต์
ดินทดลองชุดที่ 2	ดินตัวอย่างที่ 3	12.7 เปอร์เซ็นต์	87.3 เปอร์เซ็นต์
ดินทดลองชุดที่ 3	ดินตัวอย่างที่ 4	0 เปอร์เซ็นต์	100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3-2 ขนาดคละของดินตัวอย่าง

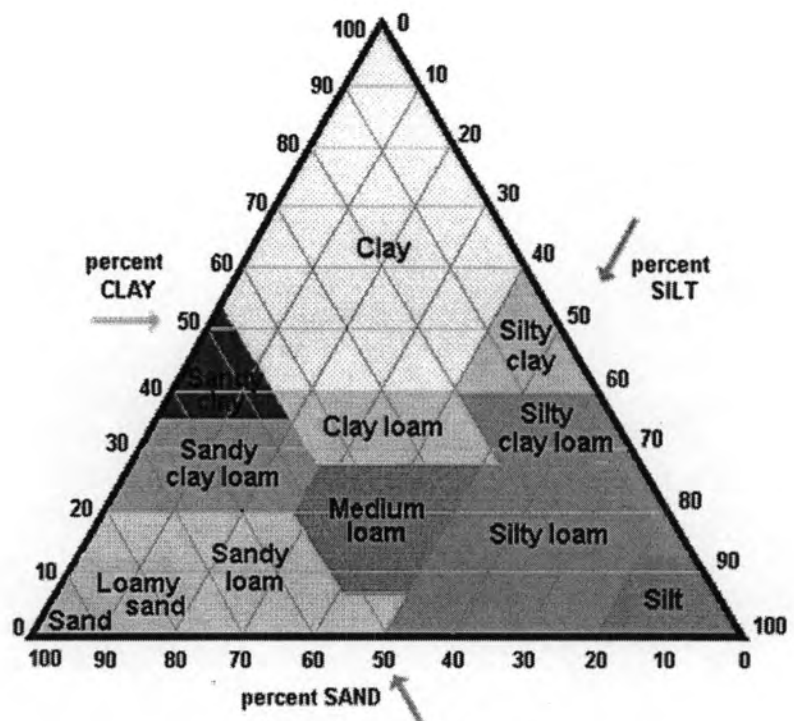
Table 2. Soil-separate Size Limits of ASTM^a, AASHTO^b, USDAC^c, PAC^d, Corps of Engineers, and USBR^e

American Society for Testing and Materials	colloids	clay	silt		fine sand	medium sand	coarse sand	gravel																				
American Association of State Highway Officials	colloids	clay	silt		fine sand	coarse sand	fine gravel	medium gravel	coarse gravel	boulders																		
U.S. Department of Agriculture	clay		silt		very fine sand	fine sand	medium sand	coarse sand	very coarse sand	fine gravel	coarse sand	cobbles																
Federal Aviation Administration	clay		silt		fine sand	coarse sand	gravel																					
Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation	fines (silt or clay)				fine sand	medium sand	coarse sand	fine gravel	coarse gravel	cobbles																		
	sieve sizes				270	200	140	60	40	20	10	4	1.18	0.85	0.425	0.25												
	.001	.002	.004	.008	.01	.02	.04	.06	.08	.1	.2	.3	.4	.6	.8	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	10	20	30	40	60	80	
	Particle size, mm.																											

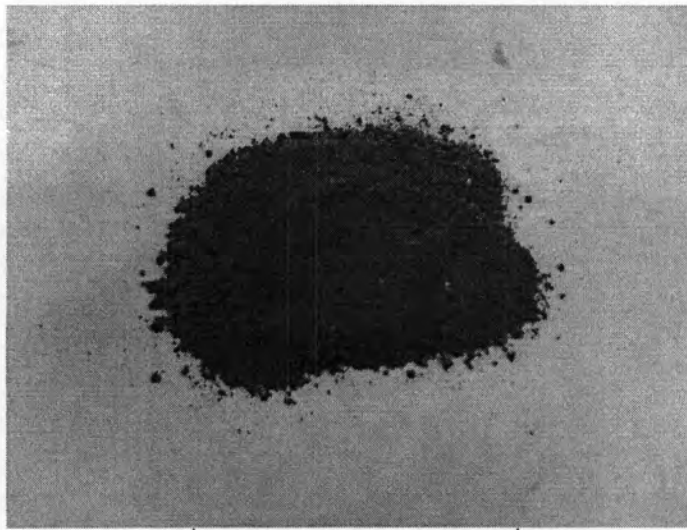
^aAmerican Society for Testing and Materials
^bAmerican Association of State Highway Officials
^cU.S. Department of Agriculture
^dFederal Aviation Administration
^eU.S. Bureau of Reclamation
 Source: Portland Cement Association, *Soil Primer* (Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 1956).

รูปที่ 3-3 การจำแนกชนิดของดินตามมาตรฐานต่างๆ

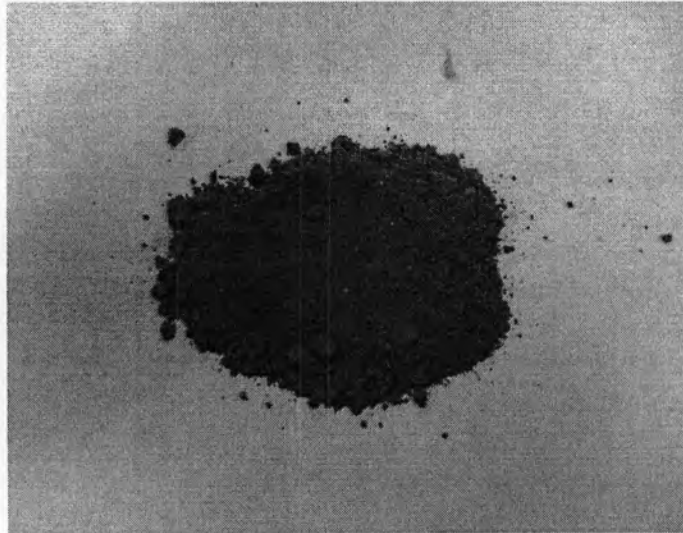
ที่มา : Bush (1984)



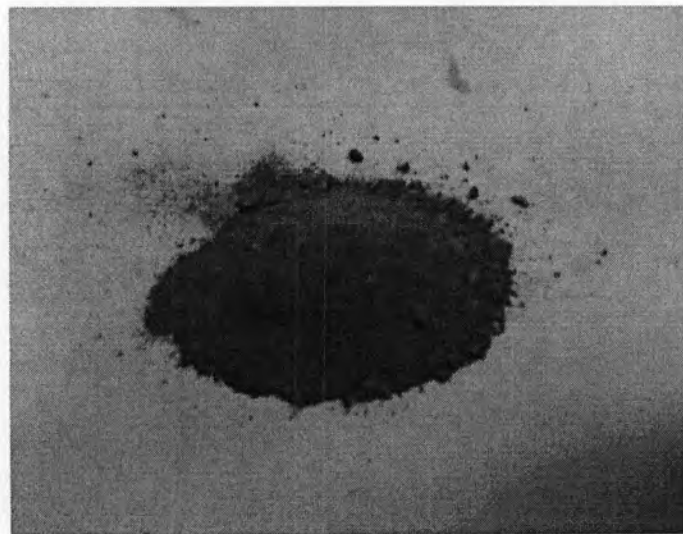
รูปที่ 3-4 การจำแนกชนิดของดิน
ที่มา : One Plan (2004)



รูปที่ 3-5 ลักษณะดินทดลองชุดที่ 1



รูปที่ 3-6 ลักษณะดินทดลองชุดที่ 2



รูปที่ 3-7 ลักษณะดินทดลองชุดที่ 3

3.1.2 คุณสมบัติสารเทอร์เซอร์และสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ

3.1.2.1 คุณสมบัติสารเทอร์เซอร์

ในการศึกษานี้เลือกใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึ่งเตรียมจากเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็นสารเทอร์เซอร์ชนิดที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา (Conservative Tracer)

โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride) มีสูตรเคมีคือ NaCl มีชื่อที่เรียกทั่วไปคือ เกลือแกง หรือ เกลือโต๊ะ (Table Salt) โซเดียมคลอไรด์เป็นเกลือมีบทบาทต่อความเค็มของมหาสมุทรและของเหลวภายนอกเซลล์ของสิ่งมีชีวิตหลายเซลล์ เป็นส่วนประกอบหลักในเกลือที่กินได้ มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการเป็นเครื่องปรุงรส และใช้ในการถนอมอาหาร ในการศึกษา

วิจัยในศาสตร์ด้านน้ำใต้ดินทั้งในและต่างประเทศ สารเทอร์เซอร์นิยมใช้สารนี้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่ดีและมีราคาถูกสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีราคาไม่สูงนัก นอกจากนี้โซเดียมคลอไรด์ที่สามารถใช้เป็นสารเทอร์เซอร์แล้ว ยังมีสารละลายโบรไมด์ ซึ่งเตรียมจากเกลือโซเดียมโบรไมด์เป็นอีกสารหนึ่งที่นิยมใช้เช่นกัน คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโซเดียมคลอไรด์แสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโซเดียมคลอไรด์

คุณสมบัติ	ค่า
สูตรทางเคมี	NaCl
สถานะ	ของแข็ง
สี	ขาวหรือไม่มีสี
น้ำหนักโมเลกุล	58.4
จุดเดือด	1465 องศาเซลเซียส
จุดเยือกแข็ง	801 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	2.16 ก./ซม. ³
ความสามารถในการละลายน้ำ	35.9 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส

3.1.2.2 คุณสมบัติสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ

จากข้อมูลกรมควบคุมมลพิษและโครงการศึกษาวิจัยการประเมินความเสี่ยงการปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำใต้ดินในบริเวณ จ.นครราชสีมา โดยหน่วยปฏิบัติการระบบการวิจัยการจัดการแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยพบว่า สารปนเปื้อนที่พบเป็นในบ่อบาดาลที่ความเข้มข้นสูงเกินกว่ามาตรฐานน้ำใต้ดินและสามารถเป็นตัวแทนของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำได้คือ สารเบนซีนเป็นตัวแทนของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำและสารไตรคลอโรเอธิลีนเป็นตัวแทนของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ

1. สารเบนซีน

ชื่อเคมี (IUPAC) คือ Benzene หรือมีชื่อทางเคมีทั่วไป คือ Benzol ใช้ในขบวนการผลิตเอทิลเบนซิล คูมิน ไซโคลเฮกเซน ไนโตรเบนซีน ดีเทอเจนอัลคิลเลท คลอโรเบนซีน และมาลลิกแอนไฮไดรด์ เบนซีนถูกใช้เป็นสารตัวทำละลายและเป็นสารทำปฏิกิริยาใน

ห้องปฏิบัติการ คุณสมบัติของสารนี้แสดงดังตารางที่ 3-4 สารเคมีนี้มีอันตรายต่อสุขภาพสามารถรับสารเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และสัตว์ได้หลายทางเช่น การหายใจ สัมผัสทางผิวหนัง กินหรือกลืนเข้าไป สัมผัสถูกตา จากข้อมูลกรมควบคุมมลพิษอันตรายจากการรับสารเบนซินสามารถสรุปได้ดังนี้

การหายใจ การหายใจเอาสารนี้เข้าไป ผลกระทบของการสัมผัสสารนี้จะไปกดระบบประสาทส่วนกลางก่อให้เกิดอาการเวียนศีรษะ ง่วงซึม ปวดศีรษะ คลื่นไส้ เกิดภาวะการทำงานไม่ประสานกัน มึนงง และทำให้หมดสติได้ การสัมผัสสารนี้ที่ความเข้มข้น 50-150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะก่อให้เกิดอาการปวดศีรษะ และอ่อนเพลีย ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อจมูกและลำคอ อาจจะมีอาการเวียนศีรษะเป็นอาการนำก่อนจะเกิดอาการอื่น ๆ ตามมา การสัมผัสสารนี้ที่ความเข้มข้นประมาณ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้เสียชีวิต

สัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสสารนี้ทางผิวหนังจะก่อให้เกิดอาการระคายเคืองเล็กน้อยและทำให้ผิวหนังแห้ง

กินหรือกลืนเข้าไปจะเกิดการดูดซึมอย่างรวดเร็วและไปมีฤทธิ์กดระบบประสาทส่วนกลางก่อให้เกิดอาการคล้ายการหายใจรับสารเข้าไป การสัมผัสถูกตา ไอระเหยของสาร ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา

ผลกระทบอื่นๆของสารเบนซินจัดเป็นสารก่อมะเร็งตามบัญชีรายชื่อ IARC NTP ACGIH เมื่อมีการรับสารกับเบนซินที่ความเข้มข้นสูงอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ สารนี้มีอันตรายต่อผู้รับสารเมื่อมีการรับสารเข้าสู่ร่างกายในระยะยาว หรือการสัมผัสถูกผิวหนังเป็นระยะเวลานาน ๆ จะทำให้เกิดผื่นแดง ผิวหนังแห้ง อักเสบ และทำให้เกิดการสูญเสีย/ทำลายชั้นไขมันของผิวหนัง สารนี้จะทำให้จำนวนเม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาว และเกล็ดเลือดมีปริมาณลดลง แต่เมื่อรับสารเข้าสู่ร่างกายเป็นเวลานาน จะก่อให้เกิดภาวะโลหิตจางและเกิดความผิดปกติต่อเม็ดเลือดขาว (Leukemia) เนื่องจากเบนซินสามารถทำลายไขกระดูกซึ่งมีหน้าที่ผลิตเม็ดเลือดจึงทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง และเกิดความผิดปกติของเม็ดเลือดขาว ขึ้น รวมทั้งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกัน นอกจากนั้นพบว่าเบนซินสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อปลายประสาทและไขสันหลัง ทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ ปวดเมื่อย เมื่อยล้า นอนไม่หลับ และความจำเลอะเลือน

2. สารไตรคลอโรเอธิลีน

ชื่อเคมี (IUPAC) คือ Trichloroethene หรือมีชื่อทางเคมีทั่วไป คือ Trichloroethylene ย่อว่า TCE เป็นต้น เป็นสารที่ได้จากกระบวนการชก้างในโรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงเป็นสารที่ใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ คุณสมบัติของสารไตรคลอโรเอธิลีนแสดงในตารางที่ 3-5 สารเคมีนี้มีอันตรายต่อสุขภาพ สามารถรับสารเข้าสู่ร่างกายได้หลายทางเช่น การหายใจ สัมผัสทางผิวหนัง กินหรือกลืนเข้าไป สัมผัสถูกตา จากข้อมูลกรมควบคุมมลพิษอันตรายจากการรับสารมีดังนี้

การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดอาการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ เวียนศีรษะ คลื่นไส้ ไอ หายใจติดขัด หมดสติ เป็นลม และอาจเสียชีวิตได้เมื่อสัมผัสกับไอระเหยที่ความเข้มข้นสูง

สัมผัสทางผิวหนังซ้ำ หรือเป็นระยะเวลาานาน จะก่อให้เกิดอาการระคายเคืองและทำให้ผิวหนังอักเสบเนื่องจากการสูญเสียไขมันของชั้นผิวหนังได้ และอาจทำให้เกิดภาวะภูมิแพ้ต่อการสัมผัสผิวหนังได้

การกินหรือกลืนสาร เข้าไปจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อทางเดินอาหาร และทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ ไอ ปวดท้อง ท้องร่วง และอาจหมดสติได้

การสัมผัสถูกตาจากของเหลวหรือไอระเหยที่ความเข้มข้นสูงจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา และทำให้น้ำตาไหลได้

สำหรับผลกระทบอื่นๆ จากการรับสาร เข้าสู่ร่างกายนั้นสารไตรคลอโรเอธิลีนเป็นสารก่อมะเร็งตามบัญชีรายชื่อของ NIOSH การรับสารในปริมาณมาก จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตาและเยื่อเมือก ผิวหนัง และทำให้เกิดการกดระบบประสาทส่วนกลาง อาจทำให้เกิดการทำลายทางเดินอาหาร ตับ และไตได้

ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารเบนซีน

คุณสมบัติ	ค่า
สูตรทางเคมี	C_6H_6
สถานะ	ของเหลว
สี	ใส ไม่มีสี
กลิ่น	เฉพาะตัว อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน
น้ำหนักโมเลกุล	78.11
จุดเดือด	80 องศาเซลเซียส
จุดเยือกแข็ง	5.5 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ	0.877
ความหนืด	0.647 CP
ความดันไอ	75 มิลลิเมตรปรอท
ความหนาแน่นไอ	2.7
ความสามารถในการละลายน้ำ	1800 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3-5 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารไตรคลอโรเอธิลีน

คุณสมบัติ	ค่า
สูตรทางเคมี	C_2HCl_3
สถานะ	ของเหลว
สี	ใส ไม่มีสี
กลิ่น	กลิ่นคล้ายอีเธอร์
น้ำหนักโมเลกุล	131.39
จุดเดือด	87.2 องศาเซลเซียส
จุดเยือกแข็ง	-73 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ	1.476
ความหนืด	0.55 CP
ความดันไอ	60 มิลลิเมตรปรอท ที่ 20 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่นไอ	4.54
ความสามารถในการละลายน้ำ	1100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส

3.1.3 เครื่องมือวัดความเข้มข้นเกลือคลอไรด์และความเข้มข้นสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีน

เครื่องมือวัดความเข้มข้นเกลือคลอไรด์และความเข้มข้นสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนในการศึกษานี้ประกอบด้วยเครื่องมือหลัก 3 ชนิดด้วยกันได้แก่ 1. เครื่องวัดความนำไฟฟ้า 2. เครื่องยูวี-วิทิเบล 3. เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รายละเอียดของเครื่องมือแต่ละชนิดมีดังนี้

3.1.3.1 เครื่องวัดความนำไฟฟ้า

สำหรับการศึกษาในโครงการวิจัยนี้จะใช้เครื่องวัดความนำไฟฟ้า (Microprocessor Conductivity Meter) ในการวัดความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าจากแบบจำลองกายภาพโดยค่าความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเกลือคลอไรด์ เครื่องมือที่ใช้เป็นของยี่ห้อ WTW รุ่น LF 325 มีค่าที่วัดได้อยู่ในช่วง 1-24,800 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร มีค่าความไวต่อการวัดน้อยกว่า 20 วินาที และมีอุณหภูมิที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วง -5 ถึง 100 องศาเซลเซียส ลักษณะเครื่องวัดความนำไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 เครื่องวัดความนำไฟฟ้า

3.1.3.2 เครื่องยูวี-วิสิเบิล

เครื่องยูวี-วิสิเบิล (UV-Visible Spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความเข้มข้นของรังสีหรือการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำ ในการศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาวิธีเฉพาะสำหรับวัดความเข้มข้นสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล โดยรายละเอียดจะอยู่ในหัวข้อถัดไป ปริมาณความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายในตัวอยางและระยะทางที่ลำแสงต้องเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางในตัวอยางน้ำ เครื่องยูวี-วิสิเบิล ที่ใช้ในการศึกษานี้ ยี่ห้อ Thermo Electron Corporation รุ่น Helios Alpha แสดงดังรูปที่ 3-9 หลักการทำงานของเครื่องมือนี้ใช้ทฤษฎีของกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) และกฎของเบียร์ (Beer's Law) โดยมีเนื้อหาดังนี้

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) มีใจความว่า "เมื่อมีแสงเดี่ยว (Monochromatic Light) ซึ่งคือแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกตัวกลางในแต่ละชั้นดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน"

กฎของเบียร์ (Beer's law) มีใจความว่า "เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น"

อุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องยูวี-วิซิเบิล คือ 1. แหล่งกำเนิดรังสี (Source) 2. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) 3. อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Recorder) 4. เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง มีรายละเอียดดังนี้

แหล่งกำเนิดรังสี แหล่งกำเนิดรังสีในสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่นิยมใช้กันแพร่หลายคือ หลอดไฮโดรเจนและหลอดดิวทีเรียมความดันต่ำ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องที่ตีที่ติดตั้งตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 160-360 นาโนเมตร มีทั้งประเภทใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (2,200-6,600 โวลต์) และประเภทใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ (ประมาณ 40 โวลต์) หรือใช้หลอดทังสเตนซึ่งประกอบด้วยหลอดทังสเตนอยู่ในหลอดสุญญากาศซึ่งให้รังสีที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วง รังสียูวีใกล้ ช่วงแสงที่เห็นได้จนถึงช่วงอินฟราเรด หลอดชนิดนี้มีราคาถูกและหาได้ง่ายในท้องตลาด

โมโนโครเมเตอร์ เป็นชิ้นส่วนสำคัญในการกำหนดคุณภาพของสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ทำหน้าที่แยกลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องออกเป็นลำรังสีความยาวคลื่นเดียว ในช่วงแสงที่แลเห็นได้อาจใช้ปริซึมแก้ว ส่วนในช่วงยูวี จำเป็นต้องใช้ปริซึมที่ทำด้วยควอตซ์ สำหรับสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีราคาแพง มักใช้โมโนโครเมเตอร์แบบดิฟแฟรคชันแกรทติ้ง (Diffraction Grating) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยช่องเป็นจำนวนมากและความกว้างของช่องเหล่านี้จะถูกออกแบบให้ใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสี

อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ หลังจากทีลำรังสีความยาวคลื่นเดียวผ่านสารที่ต้องการวัดการดูดกลืนแล้ว จะไปตกที่อุปกรณ์รับสัญญาณซึ่งจะแสดงผลข้อมูลการดูดกลืนลำแสงสำหรับสเปคโตรโฟโตมิเตอร์การแสดงผลของข้อมูลการดูดกลืนแสงอยู่ในภาพการป้ายเบนของเข็มบนหน้าปัดมิเตอร์ หรือปรากฏเป็นตัวเลขก็ได้ ในกรณีเช่นนี้ ต้องบันทึกข้อมูลเหล่านี้สำหรับแต่ละความยาวคลื่นในกระดาษกราฟ เส้นที่เชื่อมจุดต่าง ๆ ก็คือสเปคตรัมนั่นเอง สำหรับสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นเองโดยอัตโนมัติ จะมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณอยู่ด้วยสามารถบันทึกออกมาเป็นสเปคตรัมได้โดยตรง สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดนี้มีราคาแพง

เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง เนื่องจากแก้วธรรมดาดูดกลืนรังสีในช่วงยูวี จึงจำเป็นต้องใช้เซลล์ที่ทำด้วยควอตซ์แทน เซลล์ที่นิยมใช้มีความหนา 1.00 ซม. การรักษาความสะอาดเซลล์เป็นเรื่องสำคัญมากสำหรับการวัดสเปคตรัม ไม่ควรปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยไปจนเหลือสารตัวอย่างติดอยู่กับเซลล์ ควรล้างเซลล์ให้สะอาดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์หรือน้ำกลั่นตามความเหมาะสม เช็ดผิวภายนอกเซลล์ด้วยกระดาษเฉพาะสำหรับเช็ดเซลล์แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศก็เป็นการเพียงพอ ไม่ควรใช้กรดโครมิกล้างเซลล์ควรแยกเซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายของสารอินทรีย์ออกจากเซลล์ที่บรรจุสารอนินทรีย์ เพื่อให้ง่ายต่อการล้างทำความสะอาด เซลล์ควอตซ์นี้มีราคาแพงจึงควรเก็บรักษาไว้อย่างดีที่สุด ลักษณะเซลล์บรรจุตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-9 เครื่องยูวี-วิสิเบิล



รูปที่ 3-10 เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง

3.1.3.3 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography (GC)) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนในการศึกษานี้ เครื่องมือนี้จะทำหน้าที่แยกองค์ประกอบของสารประกอบต่างๆในตัวอย่างน้ำโดยอาศัยการทำงานของตัวตรวจวัดองค์ประกอบประเภทต่างๆที่ติดตั้งในเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ในการตรวจสอบองค์ประกอบเหล่านั้นเมื่อตัวอย่างน้ำเคลื่อนตัวผ่านคอลัมน์เฉพาะตามคุณสมบัติของเลขมวล (Mass Number) เมื่อประกอบกับการสร้างความสัมพันธ์ของสัญญาณคลื่น (Spectral) ในรูปของพื้นที่สัญญาณ/ความสูงสัญญาณ (Peak Area/Height) และความเข้มข้นของสารองค์ประกอบหนึ่งในรูปแบบ

ของเส้นปรับเตรียม (Calibration Curve) แล้ว สามารถจะตรวจวัดความเข้มข้นของสารประกอบที่ต้องการวิเคราะห์ได้ ลักษณะเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี แสดงดังรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

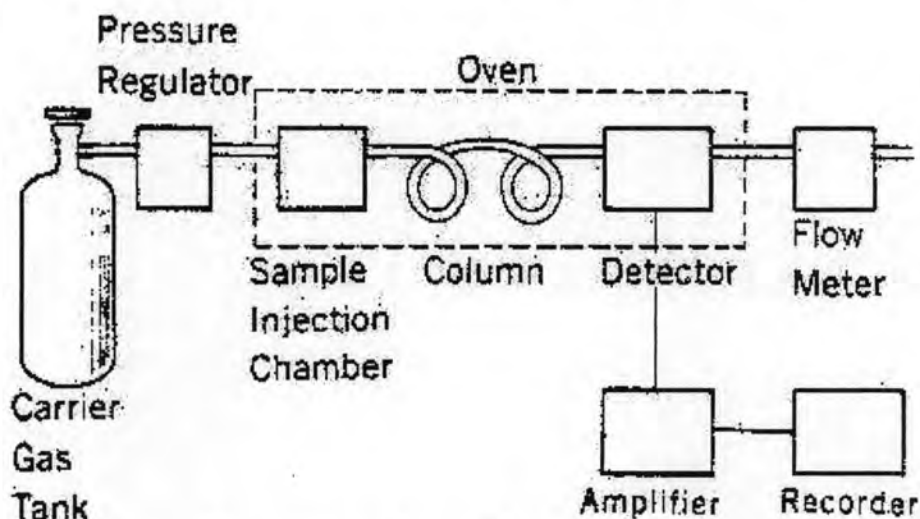
การใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีเป็นเทคนิคที่มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารปนเปื้อนโดยเฉพาะสารอินทรีย์ระเหย การวิเคราะห์ต้องอาศัยทั้งสแตชันนารีเฟส (Stationary Phase) และโมบายเฟส (Mobile Phase) องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ 1. อินเจคเตอร์ (Injector) 2. โอเวน (Oven) 3. ดีเทคเตอร์ (Detector) แผนผังแสดงลักษณะการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแสดงดังรูปที่ 3-12

อินเจคเตอร์ คือส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่ตัวเครื่อง และผ่านกระบวนการทำให้เกิดการเป็นไอพร้อมกับถูกทำให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะส่งเข้าสู่คอลัมน์อุณหภูมิที่เหมาะสมของอินเจคเตอร์ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถระเหยได้แต่ต้องไม่ถูกทำให้สลายตัว (Decomposition)

โอเวน คือส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุคอลัมน์เอาไว้และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ให้เปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างนั้น ซึ่งอุณหภูมิของโอเวนนั้นจะสามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 แบบคือการปรับอุณหภูมิแบบไอโซคราติก (Isocratic Temperature) และการปรับอุณหภูมิแบบลาดชัน (Gradient Temperature) แล้วแต่ความเหมาะสมกับตัวอย่างที่จะตรวจวิเคราะห์ ข้อดีของการปรับอุณหภูมิแบบลาดชันคือสามารถใช้กับสารตัวอย่างที่มีจุดเดือดกว้าง (Wide Boiling Range) และยังช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์ลงได้อีกด้วย (Analysis Time)

ดีเทคเตอร์ คือส่วนที่จะใช้สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นหรือปริมาณสารองค์ประกอบในตัวอย่างน้ำ ซึ่งความสามารถของการ

ตรวจวัดนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของดีเทคเตอร์ที่เลือกใช้ ชนิดของดีเทคเตอร์ที่ใช้กับเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีนั้นมีอยู่หลายอย่าง ได้แก่ Thermal Conductivity Detector (TCD), Flame Ionization Detector (FID), Electron Capture Detector (ECD) และ Mass Spectrometry



รูปที่ 3-12 หลักการทำงานเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

3.1.4 อุปกรณ์ทดลอง

รายละเอียดอุปกรณ์ทดลองที่ใช้ในการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนย่อย ดังนี้ 1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการเตรียมสารละลายมาตรฐาน 2. คอลัมน์ 3. เครื่องสูบน้ำ และ 4. เครื่องมือเก็บตัวอย่าง

3.1.4.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการเตรียมสารละลาย

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยสารเทอร์เซอร์ที่เชื่อมต่อปฏิกิริยา ในการศึกษาเลือกใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึ่งเตรียมจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl, ดีกษาภัณฑ์) สำหรับตัวแทนสารปนเปื้อนประเภทสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำมีความถ่วงจำเพาะต่ำและสูงกว่าน้ำที่นำมาใช้ในการศึกษาคือสารไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene (TCE), Lab-Scan, Analytical Reagent A.R. Assay GC 99.5%) และสารเบนซีน (Benzene, Carlo Erba Reagent, ACS for analysis Assay GC >99.8%) คุณสมบัติของสารทั้ง 3 ชนิดแสดงไว้ดังตารางที่ 3-3 ถึง 3-5 ในการทดลองศึกษาการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจะดำเนินการในแบบจำลองประเภทคอลัมน์ (Column) จะใช้สารละลายผสมระหว่างสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนน้ำกลั่น (DI Water) โดยเลือกความเข้มข้นของสารปนเปื้อนให้ใกล้เคียงกับสภาวะ

อิมัลชันในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane, Merck) ถูกนำมาใช้เป็นตัวสกัด แยกสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนออกจากน้ำตัวอย่าง

การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำกลั่น 1 ชุดความเข้มข้นทำได้โดยเตรียมจากสารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์ โดยสารละลายที่ใช้จะมีความเข้มข้น 1360 มิลลิกรัมต่อลิตรเนื่องจากความเข้มข้นในช่วงนี้เครื่องวัดความนำไฟฟ้าสามารถให้ค่าความนำไฟฟ้าที่ละเอียดได้ เมื่อนำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดความนำไฟฟ้าพบว่าสารละลายที่เตรียมไว้มีค่าความนำไฟฟ้าเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 3,300 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร

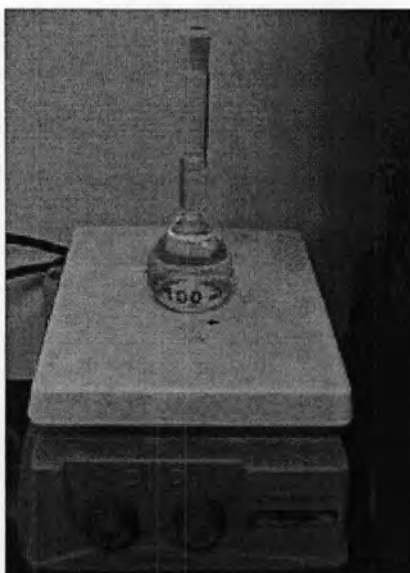
การเตรียมสารละลายมาตรฐานผสมระหว่างสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีน 1 ชุดความเข้มข้นทำได้โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานผสมระหว่างสารเบนซีน และสารไตรคลอโรเอธิลีนโดยที่สารเบนซีนปิเปตด้วยปริมาณ 79.5 ไมโครลิตรและสารไตรคลอโรเอธิลีนปิเปตด้วย ปริมาตร 47.5 ไมโครลิตร ในขวดมีฝาปิดขนาด 100 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3-13 นำขวดที่ผสมสารไป กวนผสมด้วยเครื่องกวนผสมแบบหมุนวน (vortex-mixture) ดังรูปที่ 3-14 เป็นเวลาประมาณ 6-7 ชั่วโมง หรือเมื่อสารละลายในน้ำจุนหมด ความเข้มข้นสุดท้ายของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีน จากการเตรียมโดยวิธีดังกล่าวข้างต้นจะเท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร



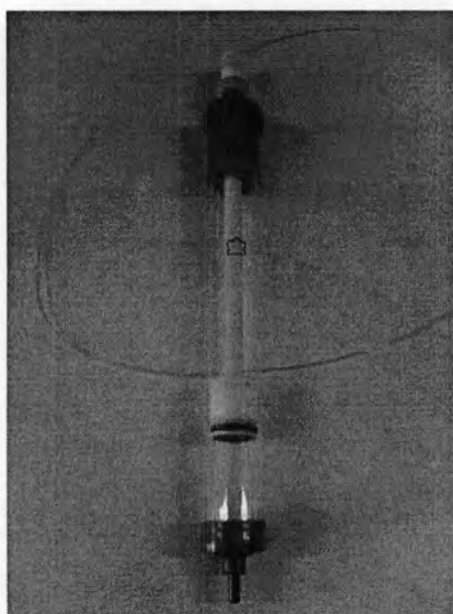
รูปที่ 3-13 ขวดมีฝาปิดขนาด 100 มิลลิลิตร

3.1.4.2 คอลัมน์

ชุดแบบจำลองกายภาพเพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยผ่านตัวกลางรูปทรงแบบวงภายใต้สภาวะชั้นน้ำอิ่มตัวใช้คอลัมน์ ทำจากแก้ว (Borosilicate Glass) ยี่ห้อ Kontes รุ่น Economic Flex Column รหัส 420400 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. มีความยาว 20 ซม. ใช้ร่วมกับฝาปิดคอลัมน์ (Flow Adaptor) ทำจากเทฟลอน (Teflon) ยี่ห้อ Kontes รุ่น Flow Adaptor Economic Flex Column รหัส 420415 เมื่อประกอบชุดคอลัมน์และฝาปิดคอลัมน์เข้าด้วยกันจะมีลักษณะดังรูปที่ 3-15



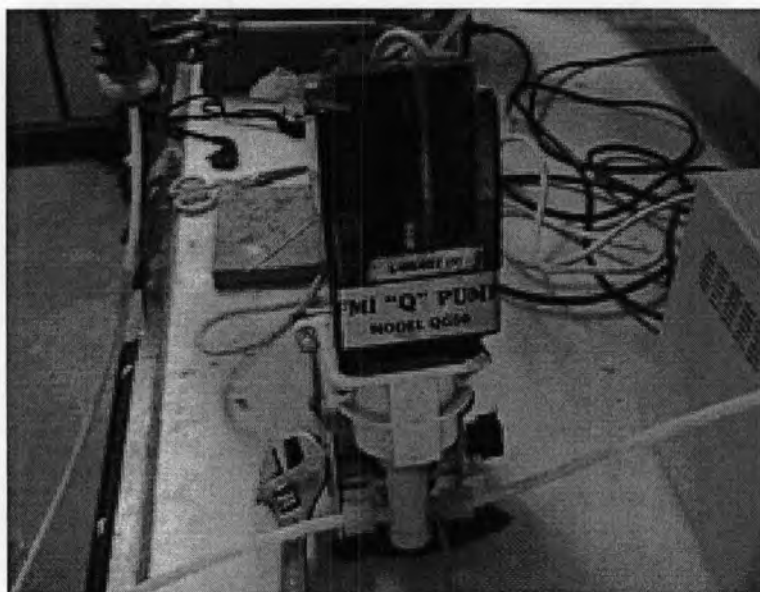
รูปที่ 3-14 เครื่องกวนผสมแบบหมุนวน



รูปที่ 3-15 คอลัมน์และฝาปิดคอลัมน์

3.1.4.3 เครื่องสูบน้ำ (Pump)

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักอีกส่วนหนึ่งคือเครื่องสูบน้ำเพื่อใช้ในการนำพาสารเทอร์เซอริหรือสารปนเปื้อนเข้าสู่คอลัมน์ด้วยอัตราการไหลที่ได้รับการออกแบบไว้ สำหรับเครื่องสูบน้ำที่เลือกใช้เป็นเครื่องสูบน้ำชนิดลูกสูบ (Piston Pump) ยี่ห้อ Cerampump รุ่น QG50 มีอัตราการไหลสูงสุด 50 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะเครื่องสูบน้ำแสดงดังรูป 3-16



รูปที่ 3-16 เครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบ

3.1.4.4 เครื่องมือเก็บตัวอย่าง

อัตราการระเหยของสารเทอร์เซอริและสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำมีค่าแตกต่างกันมากจึงไม่สามารถใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างชนิดเดียวกันได้ ดังนั้นเครื่องมือเก็บตัวอย่างแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

1. การเก็บตัวอย่างจากสารเทอร์เซอริใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างอัตโนมัติ (Fraction Collector) ยี่ห้อ Pharmacia Biotech รุ่น RediFrac เครื่องมือชนิดนี้สามารถตั้งเวลาการเก็บเป็นนาที, วินาทีและเป็นหยดได้ จะใช้ร่วมกับหลอดเก็บตัวอย่างพลาสติกขนาด 17 มิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ 3-17

2. การเก็บตัวอย่างด้วยขวดแก้วสีขาขนาด 6 มิลลิลิตร และห่อด้วยกระดาษตะกั่วที่ด้านบนเพื่อลดการระเหยของตัวอย่างสู่บรรยากาศ แสดงดังรูป 3-18



รูปที่ 3-17 เครื่องมือเก็บตัวอย่างอัตโนมัติและหลอดเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 3-18 ขวดแก้วสีชาใช้เก็บตัวอย่างสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ

3.1.5 วิธีการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจะแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ 1. การบรรจุดินในคอลัมน์ (Pack Column) และการหาปริมาตรช่องว่างดินทดลอง (Pore Volume) 2. การศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของสารเทอร์เซอร์ในแบบจำลองกายภาพ 3. การศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนในแบบจำลองกายภาพ มีรายละเอียดดังนี้

3.1.5.1 การบรรจุดินในคอลัมน์และการหาปริมาตรช่องว่างดินทดลอง

การศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยผ่านตัวกลางรุกรานภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ เริ่มต้นการจำลองลักษณะชั้นน้ำอิ่มตัวโดยการเตรียมดินในคอลัมน์ใช้วิธีบรรจุดินภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Wetted Pack) มีขั้นตอนดังนี้

1. นำดินอบแห้งและน้ำที่เตรียมไว้ไปชั่งน้ำหนัก
2. เทน้ำ(ที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแล้ว)ใส่ลงในคอลัมน์ให้ระดับผิวหน้ามีความสูงประมาณ 5 มิลลิเมตร
3. เทดิน(ที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแล้ว) ลงไปในคอลัมน์จนระดับดินต่ำกว่าระดับผิวน้ำประมาณ 2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3-19
4. นำคอลัมน์ใส่ในเครื่องหมุนวน (Vortex ยี่ห้อ Scientific Industries รุ่น G-560E) เพื่อไล่ฟองอากาศภายในคอลัมน์ให้เครื่องสั่นคอลัมน์ไว้ประมาณ 15 วินาที
5. ทำตามขั้นตอนที่ 2-4 จนความสูงของดินในคอลัมน์มีความสูง 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3-20

น้ำและดินที่คงเหลือจากการบรรจุดินในคอลัมน์นำไปชั่งอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักน้ำและดินทั้งหมดที่ใช้ในคอลัมน์ น้ำหนักของน้ำในคอลัมน์คือปริมาตรช่องว่างของดินทดลองนั้น น้ำหนักของดินในคอลัมน์จะนำไปใช้คำนวณหาค่าความพรุน การคำนวณหาปริมาตรช่องว่างดินทดลองเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญเนื่องจากปริมาตรช่องว่างดินทดลองที่คำนวณได้จะนำไปใช้ในการออกเก็บจำนวนตัวอย่างและเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 3-19 การบรรจุดินในคอลัมน์ด้วยวิธีบรรจุดินภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

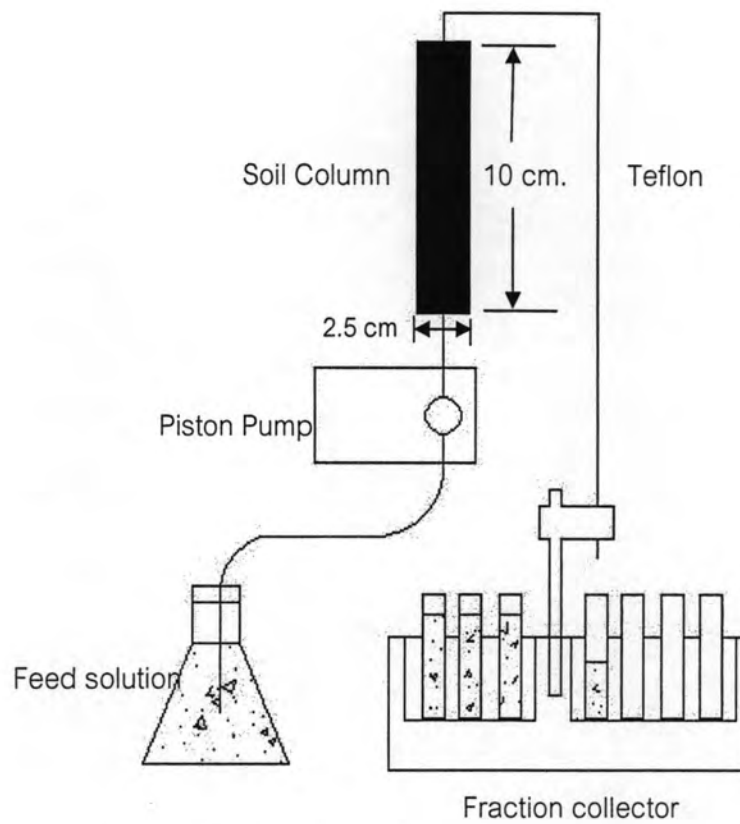


รูปที่ 3-20 การไล่ฟองอากาศด้วยเครื่องหมุนวน

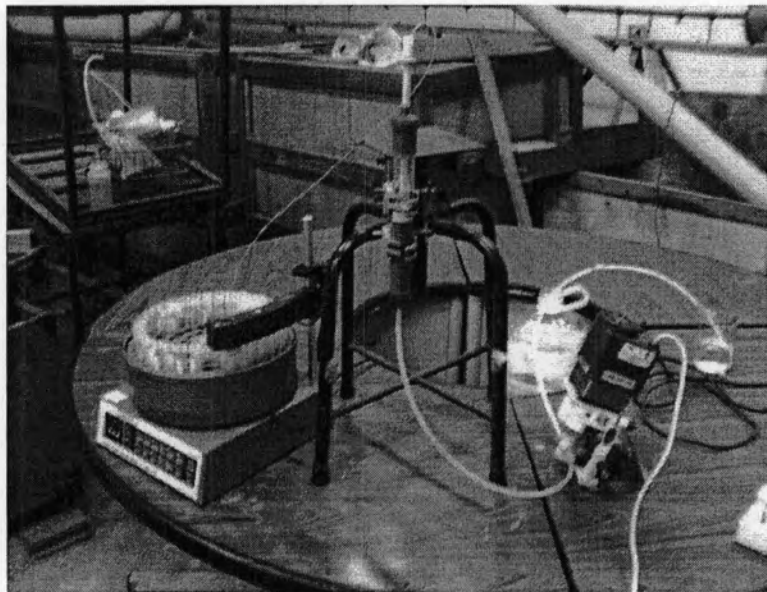
3.1.5.2 การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของสารเทรเซอร์ในแบบจำลอง กายภาพ

รูปที่ 3-21 แสดงไดอะแกรมชุดการทดลอง โดยเริ่มต้นจากเครื่องสูบน้ำแบบ ลูกสูบ จะสูบน้ำจากขวดผสมสารละลายสารเทรเซอร์ (หรือสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ) เข้าสู่คอลัมน์ น้ำที่ผ่านออกท้ายคอลัมน์จะถูกเก็บไว้โดยเครื่องเก็บตัวอย่างอัตโนมัติ(หรือขวดแก้วสีชา) ในเวลาที่ได้ออกแบบไว้ผ่านสายส่งน้ำทำจากเทฟลอนเพื่อลดอัตราการเกิดการดูดซับของสารปนเปื้อน ชุดอุปกรณ์ทดลองแสดงดังรูปที่ 3-22

การศึกษาการเคลื่อนที่ของสารเทรเซอร์ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา (Conservative Tracer) ซึ่งในที่นี้ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ไหลผ่านแบบจำลองภายใต้สภาวะที่อัตราการไหลคงที่ ใช้วิธีการนำเข้าสู่สารเทรเซอร์แบบชุด (Pulse) โดยการเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1,360 มิลลิกรัมต่อลิตรในขวดเก็บสารจากนั้นใช้เครื่องสูบน้ำชนิดลูกสูบ สูบสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง ที่อัตราการไหล 40 (อัตราการไหลต่ำ) และ 60 (อัตราการไหลสูง) มิลลิเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ ทำการเก็บตัวอย่างจากคอลัมน์ทุกๆ 0.2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลองเป็นเวลา 2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลอง จากนั้นเปลี่ยนการสูบจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นน้ำกลั่น จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 0.2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลอง ต่อเนื่องจนความเข้มข้นของสารเทรเซอร์ที่ความเข้มข้นน้ำออก มีค่าต่ำกว่าประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นในน้ำเข้าสูงสุด ตัวอย่างที่เก็บจะนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนด้วยเครื่องวัดความนำไฟฟ้า



รูปที่ 3-21 ไดอะแกรมชุดทดลอง



รูปที่ 3-22 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

3.1.5.3 การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในแบบจำลองกายภาพ

การศึกษากการเคลื่อนตัวของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในแบบจำลองกายภาพซึ่งในที่นี้ใช้สารละลายมาตรฐานผลระหว่างเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในน้ำ โดยมีความเข้มข้น 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลผ่านแบบจำลองภายใต้สภาวะที่อัตราการไหลคงที่ ใช้วิธีการนำเข้าสู่สารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนแบบชุด โดยใช้เครื่องสูบน้ำชนิดลูกสูบ สูบสารละลายผลระหว่างเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในน้ำขึ้นมาอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหล 40 (อัตราการไหลต่ำ) และ 60 (อัตราการไหลสูง) มิลลิเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ ดำเนินการเก็บตัวอย่างจากคอลัมน์ทุกๆ 0.2 ของปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง เป็นเวลา 2 ของปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง จากนั้นจึงเปลี่ยนการสูบจากสารละลายผลระหว่างเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนเป็นน้ำกลั่น จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 0.2 ของปริมาตรช่องว่างในดินทดลองต่อเนื่องจนความเข้มข้นของสารละลายเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีน ในน้ำออกมีค่าต่ำกว่าประมาณ 2-3% ของความเข้มข้นในน้ำเข้า ตัวอย่างที่เก็บจะถูกนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นด้วยเครื่องยูวี-วิทิเบิล 6 ชุดการทดลองและจะมีการทดลอง 1 ชุดการทดลองที่ตัวอย่างจะถูกสกัดทันทีด้วยตัวทำละลายไตรคลอโรมีเทน ก่อนที่จะถูกนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี โดยชุดการทดลองที่วิเคราะห์ผลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและเครื่องยูวี-วิทิเบิล จะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูล เมื่อได้ความสัมพันธ์จากข้อมูลจะนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้กับชุดการทดลองที่เหลือ

การศึกษากการเคลื่อนตัวของสารเทอร์เซอร์ในแบบจำลองกายภาพและการศึกษากการเคลื่อนตัวของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในแบบจำลองกายภาพจะดำเนินการศึกษาต่อเนื่องกัน มีขั้นตอนการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. กำหนดชุดดินทดลองและอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง
2. บรรจุน้ำในคอลัมน์และคำนวณหาค่าปริมาตรช่องว่างในดินทดลองและค่าความพรุนจากน้ำหนักของน้ำและดิน ออกแบบการเก็บจำนวนตัวอย่างและเวลาที่ใช้ในการทดลอง
3. สูบน้ำกลั่นเข้าสู่คอลัมน์และปรับอัตราการไหลตามที่ออกแบบไว้
4. สูบสารละลายไซเตียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้เข้าสู่คอลัมน์ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 0.2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลอง เป็นเวลา 2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลอง จากนั้นจึงเปลี่ยนการสูบจากสารละลายไซเตียมคลอไรด์เป็นน้ำกลั่น

5. ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 0.2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลองต่อเนื่องจนความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ในน้ำออกมีค่าต่ำกว่าประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นในน้ำเข้าจึงหยุดเก็บตัวอย่าง

6. สูบสารละลายผสมระหว่างสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนที่เตรียมไว้เข้าสู่คอลัมน์ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 0.2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลองเป็นเวลา 2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลอง จากนั้นจึงเปลี่ยนการสูบจากสารละลายผสมระหว่างสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนเป็นน้ำกลั่น

7. ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 0.2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลองต่อเนื่องจนความเข้มข้นของสารละลายผสมระหว่างสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนในน้ำออกมีค่าต่ำกว่าประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นในน้ำเข้าจึงหยุดเก็บตัวอย่าง

8. ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ด้วยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน

9. เสร็จสิ้นการทดลอง 1 ชุดการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของสารเทอร์เซอร์ในแบบจำลองกายภาพและการศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในแบบจำลองกายภาพจะดำเนินการศึกษาต่อเนื่องกัน เพื่อให้การศึกษากการเคลื่อนตัวของสารเทอร์เซอร์และสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำผ่านตัวกลางตัวเดียวกันส่งผลให้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวมีค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการทดลองจะมีทั้งสิ้น 6 ชุดการทดลอง จากการทดลองทั้ง 6 ชุดสามารถคำนวณหาค่าปริมาตรช่องว่างดินทดลอง, ค่าความพรุน, ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold Number) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ดังแสดงในตาราง 3-6

จากข้อมูลในตาราง 3-6 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ จากการคำนวณด้วยสมการคาเมน-โคเชนี มีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในตัวกลางรูพรุนด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังกล่าวในหัวข้อต่อไปจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการเนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองเป็นการคำนวณจากสภาพการไหลจริงในคอลัมน์ ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าการประมาณด้วยสมการคาเมน-โคเชนี

เมื่อพิจารณาอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองพบว่าอัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 24 และ 37 ตามลำดับ จากการศึกษาของ Todd (1980) พบว่าการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ซึ่งเป็นกรไหลที่ก่อให้เกิดสภาวะสมดุลทางเคมี (Equilibrium) มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 10 แต่จากการศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในแบบจำลองกายภาพของ Putthividhya (2004) พบว่าที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อ

ชั่วโมง(เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 10) ยังคงให้สภาวะสมดุลทางเคมี ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดใช้อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ยังคงสภาวะสมดุลทางเคมีและอัตราการไหลที่ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเพื่อทดสอบสภาพการไหลที่อาจก่อให้เกิดสภาวะไม่สมดุลทางเคมี (Nonequilibrium)

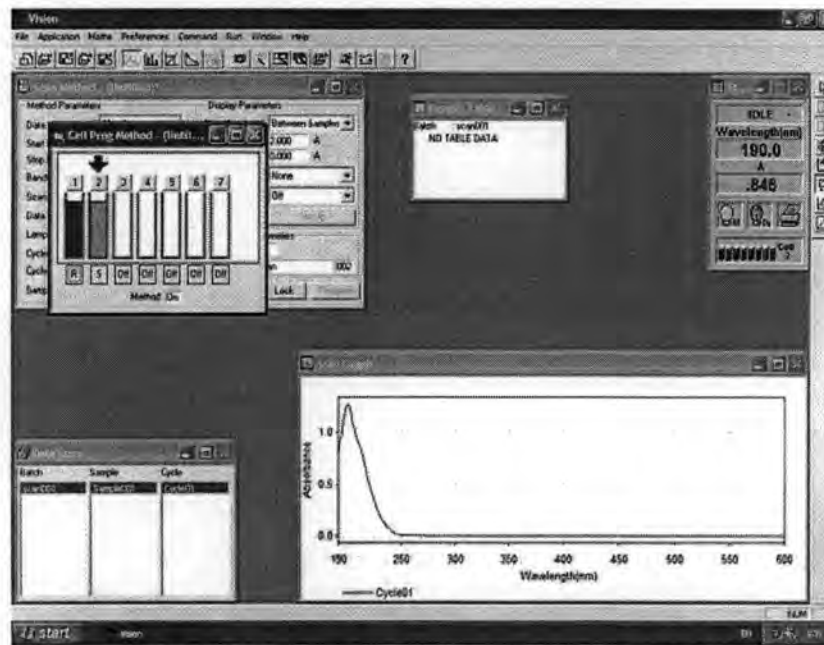
3.1.6 การพัฒนาวิธีวัดความเข้มข้นของสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนด้วยเครื่องมือยูวี-วิชิเปิล

การวิเคราะห์ข้อมูลของสารปนเปื้อนประเภทสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำโดยทั่วไปจะวัดค่าความเข้มข้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ในการวัดค่าความเข้มข้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นหากมีวิธีที่สามารถวัดค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนประเภทสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีขั้นตอนที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าน่าจะเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งได้

จากกฎของแลมเบิร์ตและกฎของเบียร์ทำให้ทราบว่าค่าการดูดซับแสง (Absorbance) ของสารแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารและสารแต่ละชนิดจะมีช่วงการดูดซับความยาวคลื่นไม่เท่ากัน เมื่อนำสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรมาทดสอบด้วยเครื่องมือยูวี-วิชิเปิลพบว่า สารละลายไตรคลอโรเอธิลีนมีความเข้มรังสี (Spectrum) มากกว่า 1 แอบซอเบแนนซ์ และมีความยาวคลื่นสูงสุด (Wavelength) ที่ 198 นาโนเมตรดังรูปที่ 3-23 แต่เนื่องจากค่าความเข้มรังสีที่เชื่อถือได้ต้องมีค่าต่ำกว่า 1 แอบซอเบแนนซ์ ดังนั้นจึงต้องลดความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอธิลีนลงให้ค่าความเข้มรังสีน้อยกว่า 1 แอบซอเบแนนซ์

ตารางที่ 3-6 ชุดการทดลองและค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

อัตราการไหล	พารามิเตอร์	ดินทดลองชุดที่	ดินทดลองชุดที่	ดินทดลองชุดที่
		1	2	3
อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	ปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง (มิลลิลิตร)	28	28	29
	เวลาเก็บตัวอย่าง 1 ปริมาตรช่องว่าง ในดินทดลอง (นาที)	42	42	43.5
	เวลาในการฉีดสารเทรเซอร์ สารเบนซีน และสารไตรคลอโรเอธิลีน (นาที)	84	84	87
	ความพรุน	0.55	0.56	0.58
	เรย์โนลด์นัมเบอร์	24	24	24
	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (เมตรต่อวินาที)			
	สมการคาเมน-โคเซนี	0.012	0.03	0.012
	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (เมตรต่อวินาที)			
	การทดลองชนิดระดับน้ำแปรเปลี่ยน	1.6×10^{-8}	5.29×10^{-8}	2.6×10^{-8}
การทดลองชุดที่	1	3	5	
อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	ปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง (มิลลิลิตร)	28	28	29
	เวลาเก็บตัวอย่าง 1 ปริมาตรช่องว่าง ในดินทดลอง (นาที)	28	28	29
	เวลาในการฉีดสารเทรเซอร์ สารเบนซีน และสารไตรคลอโรเอธิลีน (นาที)	56	56	58
	ความพรุน	0.54	0.56	0.58
	เรย์โนลด์นัมเบอร์	37	37	37
	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (เมตรต่อวินาที)			
	สมการคาเมน-โคเซนี	0.0137	0.03	0.012
	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (เมตรต่อวินาที)			
	การทดลองชนิดระดับน้ำแปรเปลี่ยน	1.5×10^{-8}	5.21×10^{-8}	2.8×10^{-8}
การทดลองชุดที่	2	4	6	

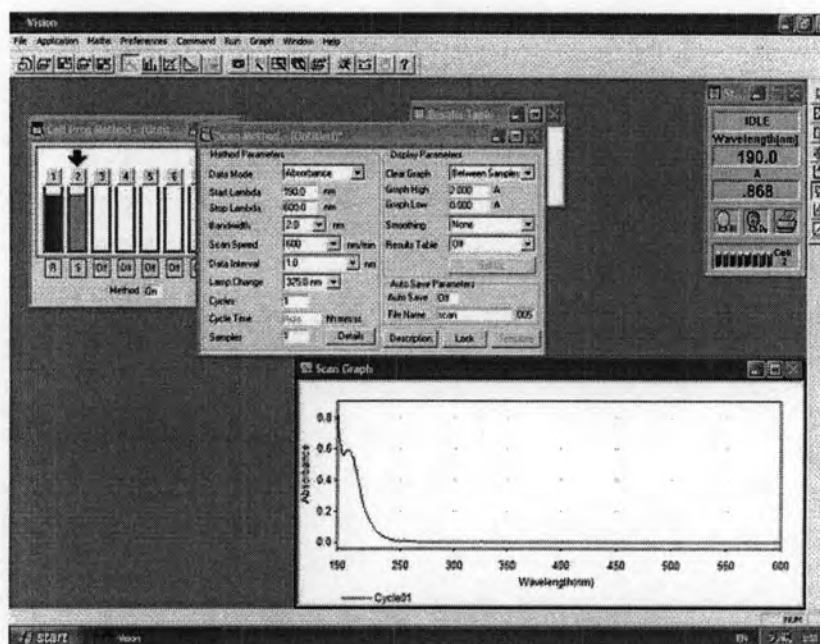


รูปที่ 3-23 ความเข้มรังสีของสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

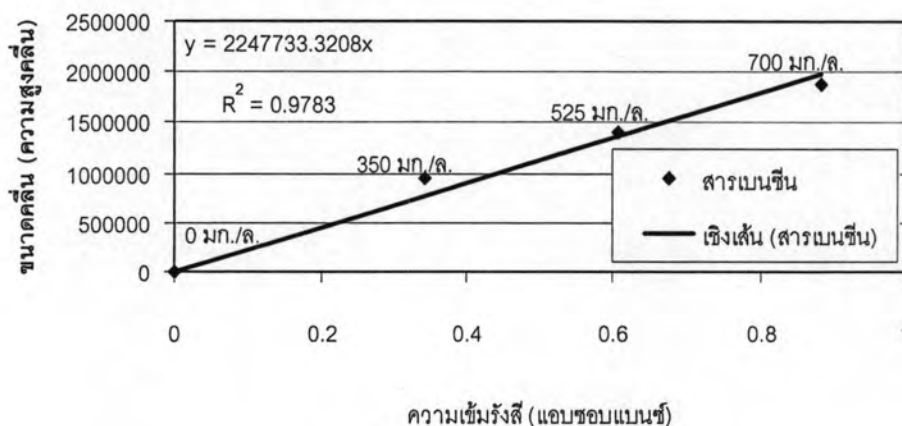
ต่อมาได้ผสมสารละลายระหว่างเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในน้ำและลดความเข้มข้นของสารลง โดยที่เบนซีนมีค่าความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและไตรคลอโรเอธิลีนมีค่าความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่าความเข้มรังสีของสารละลายทั้ง 2 ชนิดมีค่าน้อยกว่า 1 แอมป์ซอบแบนซ์และสารละลายเบนซีนมีความยาวคลื่นสูงสุดที่ 190 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4-24

จากนั้นผสมตัวอย่างสารละลายเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนที่ความเข้มข้น 0, 350, 525 และ 700 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจวัดความเข้มข้นเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและยูวี-วิชิเบิล โดยตัวอย่างที่นำไปวัดความเข้มข้นด้วยเครื่องยูวี-วิชิเบิลจะถูกนำไปลดความเข้มข้นลงก่อนเพื่อให้ค่าความเข้มรังสีมีค่าต่ำกว่า 1 แอมป์ซอบแบนซ์เมื่อได้ผลการวัดแล้วจะทำการแปลงค่าความเข้มข้นกลับเข้าสู่ความเข้มข้นเริ่มต้นอีกครั้ง

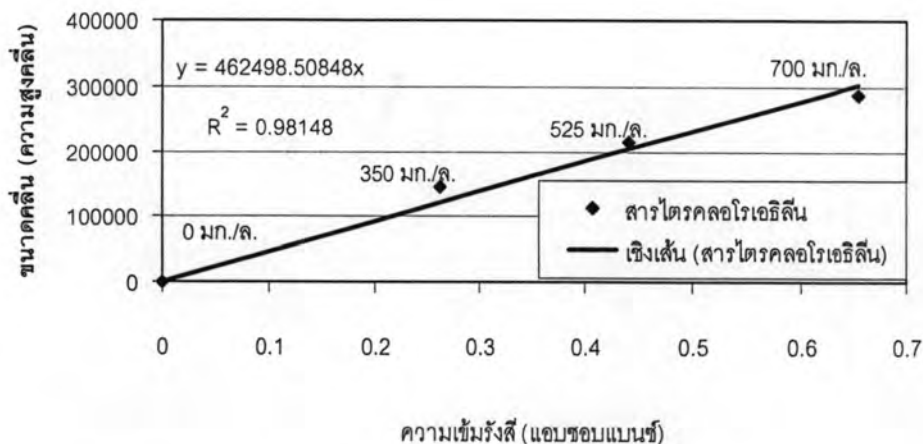
ผลการตรวจวัดความเข้มข้นด้วยเครื่องมือทั้งสองชนิดนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีจากการวัดด้วยเครื่องยูวี-วิชิเบิลที่ความเข้มข้นต่างๆ (แกน X) กับค่าขนาดคลื่น (Spectral) จากการวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่ความเข้มข้นต่างๆ (แกน Y) แสดงดังรูปที่ 3-25 และ 3-26 จากรูปดังกล่าวพบว่าความสัมพันธ์ของค่าความเข้มรังสีจากเครื่องยูวี-วิชิเบิลและค่าขนาดคลื่นจากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีมีค่า R^2 ของสารเบนซีนเท่ากับ 0.9783 และค่า R^2 ของสารไตรคลอโรเอธิลีนเท่ากับ 0.9814 นั้นแสดงว่าการใช้เครื่องมือยูวี-วิชิเบิล เพื่อวัดความเข้มข้นสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนแทนเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีสามารถใช้วัดความเข้มข้นได้ทดแทนกันได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จะใช้เครื่องยูวี-วิชิเบิลวัดความเข้มข้นของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนแทนการวัดความเข้มข้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี



รูปที่ 3-24 ค่าความเข้มรังสีของสารละลายเบนซีนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าความเข้มรังสีของสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 3-25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีจากการวัดด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลกับค่าขนาดคลื่นจากการวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีของสารเบนซีนที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 3-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นสีจากการวัดด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิลกับค่าขนาดคลื่นจากการวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีของสารไตรคอลลอโรเอธิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์

ในการศึกษาี้จะทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM เพื่อจำลองลักษณะการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ เนื้อหาในส่วแบบจำลองคณิตศาสตร์แบ่งย่อยได้ 3 ส่วนคือ 1. แบบจำลอง UTCHEM 2. ขั้นตอนและข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลอง 3. การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ระเหยผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิมิตัวในระดับห้องปฏิบัติการ

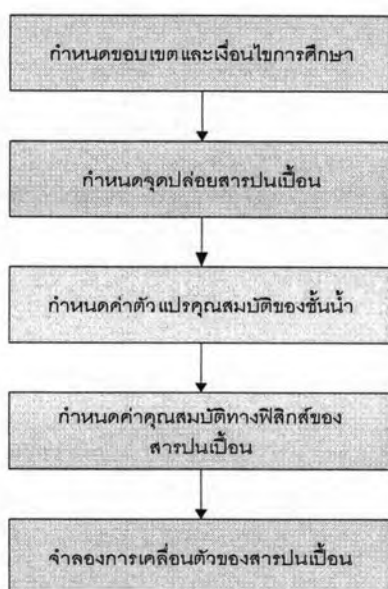
3.2.1 แบบจำลอง UTCHEM

แบบจำลอง UTCHEM (A Three-Dimension Chemical Flood Simulator) เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายตัวของสารปนเปื้อนและการฟื้นฟูสภาพจากการปกคลุมของน้ำมันในชั้นหินให้น้ำ มีการเริ่มต้นพัฒนาจาก Pope and Nelson (1978) ซึ่งเป็นการศึกษาถึงการฟื้นฟูสภาพของพื้นที่ที่ถูกปกคลุมด้วยน้ำมัน ต่อมา Bhuyan (1990) ได้พัฒนาแบบจำลองซึ่งมีการเพิ่มในส่วนของการคำนวณทางเคมีในสถานะของเหลวและของแข็ง และ Reservoir Engineering Research Program Center for Petroleum and Geosystem Engineering The University of Texas (2000) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาถึงการแพร่กระจายของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมในน้ำบาดาล โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีชื่อว่า UTCHEM

ในแบบจำลอง UTCHEM ใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ สมการการไหลและการเคลื่อนตัวของมวลจะถูกนำไปใช้แก้ปัญหาคุณสมบัติที่เฉพาะเจาะจงของส่วนประกอบทางเคมี เช่น น้ำ, องค์ประกอบของสารปนเปื้อน, สารลดแรงตึงผิว, แอลกอฮอล์, พอลิเมอร์, คอลลอยด์, แคลเซียม, ไบโอดีเกรดเดชั่น เป็นต้น

3.2.2 ขั้นตอนและข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลอง

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง UTCHEM จะแบ่งเป็น 4 ส่วน โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนอธิบายดังนี้



รูปที่ 3-27 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง UTCHEM

1. กำหนดขอบเขตและเงื่อนไขการศึกษา (Boundary Condition) เป็นการกำหนดขอบเขตของการศึกษา ด้วยการสร้างกริดเซลล์ขึ้นในแบบจำลองให้มีความเหมาะสมกับจุดประสงค์ของการศึกษา รวมทั้งกำหนดสถานะของขอบเขตเช่น ขอบเขตที่ไม่มีกรไหล ขอบเขตที่มีการไหลเข้า เป็นต้นกำหนดชั้นน้ำให้เป็นแบบอิมิตัวหรือไม่อิมิตัวหรือกำหนดให้เป็นทั้งแบบอิมิตัวและไม่อิมิตัว

2. กำหนดจุดปล่อยสารปนเปื้อน กำหนดจุดที่มีการกระจายตัวของสารปนเปื้อนลงในแบบจำลอง รวมถึงอัตราการปล่อยสารปนเปื้อนและปริมาณของสารปนเปื้อน

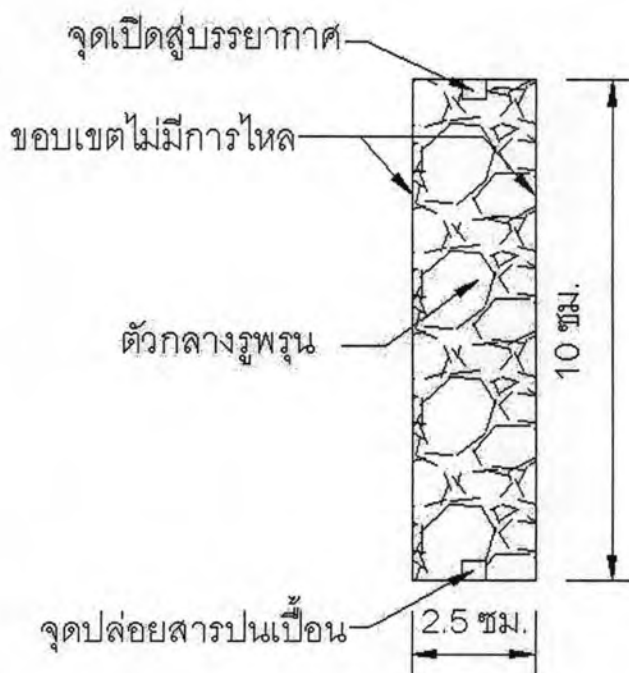
3. คุณสมบัติของชั้นน้ำใต้ดิน (Aquifer Characteristics) เช่น ความพรุน, ความดัน, สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ข้อมูลได้มาจากการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการและค่าอ้างอิงมาตรฐานจากแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้

4. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารปนเปื้อน (Physical Properties) เช่น ความหนืด, ความถ่วงจำเพาะ, การแพร่, ความสามารถในการละลายน้ำ, ตัวประกอบความหน่วง เป็นต้น คุณสมบัติเหล่านี้ได้มาจากการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการและค่าอ้างอิงมาตรฐานจากการศึกษาที่ผ่านมาในอดีต

3.2.3 การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ระเหยผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวในระดับห้องปฏิบัติการ

การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ระเหยผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวในระดับห้องปฏิบัติการเป็นการรวบรวมข้อมูลและประยุกต์ลักษณะทางกายภาพของชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนาเป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 3-

28



รูปที่ 3-28 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการ