การจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจำพวกสารอินทรีย์ระเหยในตัวกลางรูพรุน

นายเกรียงศักดิ์ มานะจิตต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LAB-SCALE SIMULATIONS OF GROUNDWATER FLOW AND VOLATILE ORGANIC COMPOUND (VOCs) MIGRATION IN POROUS MEDIA

Mr. Kriangsak Manajit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Water Resources Engineering

Department of Water Resources Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

501489

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจำพวกสารอินทรีย์ระเหยในตัวกลางรูพรุน
โดย	นายเกรียงศักดิ์ มานะจิตต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. อักษรา พฤทธิวิทยา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.อักษรา พฤทธิวิทยา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)

เกรียงศักดิ์ มานะจิตต์ : การจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจำพวกสารอินทรีย์ระเหยในตัวกลางรูพรุน. (LAB-SCALE SIMULATIONS OF GROUNDWATER FLOW AND VOLATILE ORGANIC COMPOUND (VOCs) MIGRATION IN POROUS MEDIA) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.อักษรา พฤทธิวิทยา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร.ดรรชิต ลิขิตเดชาโรจน์ 252 หน้า.

ในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทย การปนเปื้อนของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินเป็นปัญหาที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อม สารละลายจากกระบวนการชักล้างและสารอินทรีย์ระเหยซึ่งเป็นสารจำพวกสารไฮโดรคาร์บอนเป็นสารปนเปื้อนที่พบได้บ่อยในน้ำใต้ดิน ในประเทศไทยสารอินทรีย์ระเหยเป็นสารที่ทราบกันเป็นอย่างดีว่ามีอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ในการศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนประเภทสารประกอบไฮโดรคาร์บอนผ่านตัวกลางที่เป็นตัวแทนของชั้นน้ำที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน การศึกษาจะทำการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองกายภาพชนิดคอลัมภ์

การศึกษาด้วยแบบจำลองคอลัมภ์ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ เบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในการศึกษา ควบคุมการปล่อยสารแบบกะ ที่ทางเข้าผ่านตัวกลางที่เป็นตัวแทนของชั้นน้ำ การวัดความเข้มข้นสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนมีการพัฒนาใช้เครื่องยูวี-วิซิเบิลแทนเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนพบว่าสารคลอไรด์เดินทางเร็วที่สุดตามด้วยสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนตามลำดับ การวัดข้อมูลจากการทดลองพบว่าลักษณะหางที่ยาวเป็นผลกระทบของแบ็คดิฟฟิวชั่น ที่อัตราการไหลต่ำมวลของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนจะถูกดูดซับไว้ในอัตราที่สูงซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าตัวประกอบความหน่วงการปรับอัตราการไหลจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงส่งผลให้เกิดสภาวะไม่สมดุลทางเคมี ข้อมูลจากแบบจำลองกายภาพจะเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง UTCHEM

ภาควิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2550 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4770224521 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEY WORD: GROUNDWATER / NAPL / UTCHEM / CONTAMINANT TRANSPORT / POROUS MEDIA

KRIANGSAK MANAJIT : LAB-SCALE SIMULATIONS OF GROUNDWATER FLOW AND VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS(VOCs) MIGRATION IN POROUS MEDIA. THESIS ADVISOR : AKSARA PUTTHIVIDHYA DR., THESIS COADVISOR : KANCHIT LIKITDECHAROTE DR., 252 pp.

For many nations (including Thailand) groundwater contamination has become one of the most critical and challenging environmental problems. Chlorinated solvents and other volatile organic compounds such as petroleum hydrocarbon are prevalent groundwater contaminants all over the world, including Thailand. These volatile compounds are commonly known to present major risks to human health and the environment. In this study, we aimed to investigate the transport of both chlorinated solvent and petroleum hydrocarbon in the representation of aquifer spatial heterogeneities and non-uniformities by conducting laboratory column experiments.

A series of column tests was performed by introducing NaCl, TCE, and benzene solutions as two square pulses at the inlet boundary into the well packed representative natural aquifer materials. Effluents benzene and TCE concentrations analyzed using UV/VIZ illustrated the similar trend as obtained from GC analysis. Chloride, benzene, and TCE BTCs results suggested the significant late arrival of benzene peak and even later arrival of TCE peak compared to chloride. Longer tailing effects observed at the late time of the experiments due to back diffusion process. At lower flow rate, TCE and benzene molecules may be retained at a higher degree or even the predominant process affecting TCE and benzene transport is an irreversible sorption rather than retardation. Increasing flow rate from 40 to 60 mL/hr indicating that Nonequilibrium mass transfer processes between phases might have occurred. The observed data were used in UTCHEM model

Department :.....Water Resources Engineering..... Student's signature :..Kriangsak Manajit

Field of study :.....Water Resources Engineering..... Advisor's signature :.....

Academic year : 2007 Co-advisor's signature :..Kanchit Likidecharote

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงได้ ถ้าขาดความช่วยเหลือ ความอนุเคราะห์และคำแนะนำต่างๆจากบุคคลและหน่วยงานดังต่อไปนี้

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ ดร.อักษรา พฤทธิวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษาและข้อแนะนำต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์แก่ข้าพเจ้าให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล ประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำชี้แนะและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ บุคลากร เครื่องมือและอุปกรณ์การศึกษา ขอขอบพระคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำที่ให้โอกาสเข้าร่วมศึกษาวิจัยโครงการศึกษาวิจัยการประเมินความเสี่ยงการปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำใต้ดิน อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา รวมถึงสนับสนุนเงินทุนในการศึกษาครั้งนี้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณ คุณ ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ และ คุณ วีระพล เพชรานนท์ ที่ให้คำปรึกษาและข้อแนะนำต่างด้วยดีมาตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดามารดาและญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ที่ช่วยอบรมสั่งสอนและดูแลเอาใจใส่ข้าพเจ้าตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2

1.3 ขอบเขตของการศึกษา..... 2

1.4 การศึกษาที่ผ่านมา..... 3

1.5 แนวทางการศึกษา..... 8

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา..... 13

2.1 สมการการไหลของน้ำใต้ดิน..... 13

2.2 สมการการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน..... 13

2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน..... 17

2.4 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารปนเปื้อนจำพวกสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ..... 30

บทที่ 3 แบบจำลองกายภาพและแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 33

3.1 แบบจำลองกายภาพ..... 33

3.1.1 ลักษณะตัวกลางรูพรุนและการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดลอง..... 33

3.1.2 คุณสมบัติสารเทรเซอร์และสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ..... 38

3.1.3 เครื่องมือวัดความเข้มข้นเกลือคลอไรด์และความเข้มข้นสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีน..... 42

3.1.4 อุปกรณ์การทดลอง..... 47

หน้า

3.1.5 วิธีทดลอง..... 51
3.1.6 การพัฒนาวิธีวัดความเข้มข้นของสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีน ด้วยเครื่องมือยูวี-วิซิเบิล..... 57
3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์..... 61
3.2.1 แบบจำลอง UTCHEM..... 61
3.2.2 ขั้นตอนและข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลอง..... 62
3.2.3 การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ ระเหยผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวในระดับห้องปฏิบัติการ.. 63

บทที่ 4 ผลการศึกษาจากแบบจำลองกายภาพและแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 64
4.1 ผลการศึกษาจากแบบจำลองกายภาพ..... 64
4.1.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของสารเทรเซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลแบบอิ่มตัวด้วยน้ำ..... 64
4.1.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนโดยใช้เครื่องยูวี-วิซิเบิลและเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี..... 73
4.1.3 ผลการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลแบบอิ่มตัวด้วยน้ำ..... 75
4.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนจากแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 99
4.2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM..... 100
4.2.2 ผลการจำลองการเคลื่อนตัวของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM..... 97

หน้า

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ..... 112
5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองกายภาพ..... 112
5.2 สารเทรเซอร์และสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนที่ใช้ในการทดลอง..... 113
5.3 การหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของดินชุดต่างๆ..... 114
5.4 วิธีทดลองและการจำลองแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 115
5.5 สรุปผลการศึกษา..... 115
5.6 ข้อเสนอแนะ..... 118

รายการอ้างอิง..... 119
ภาคผนวก..... 122
ก การหาขนาดเม็ดดินก่อนการทดลอง..... 125
ข การหาค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อน..... 136
ค การหาปริมาณสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีน ณ เวลาต่างๆ..... 149
ง การหาความเข้มข้นของสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีน ณ เวลาต่างๆ..... 186
จ สภาพทั่วไปของพื้นที่ศึกษา..... 218
ฉ การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MODFLOW และ UTCHEM
ในพื้นที่ศึกษา..... 238

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 252

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในดินแต่ละชนิด	20
2-2	ค่าของ *W(u)* ที่ค่าต่างๆของ *u*	26
2-3	ความพรุนของดินแต่ละชนิด	28
3-1	ขนาดคละของดินชนิดที่ 1-4	35
3-2	ขนาดดินทดลอง	35
3-3	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโซเดียมคลอไรด์	39
3-4	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารเบนซีน	41
3-5	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารไตรคลอโรเอธิลีน	42
3-6	ชุดการทดลองและค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ	58
4-1	ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารเทรเซอร์ก่อนเข้าคอลัมน์ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลอง	67
4-2	ค่าการแพร่ของดินทดลองทั้ง 3 ชุด	67
4-3	ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารเทรเซอร์ผ่านดินทดลอง	73
4-4	ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางและความเข้มข้นเฉลี่ยก่อนเข้าคอลัมน์ของสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในชุดการทดลอง	97
4-5	ค่าตัวประกอบความหน่วงในดินทดลองแต่ละชุด	99
4-6	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง	102

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1-1	ขั้นตอนการศึกษา	11
2-1	กระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างของความเข้มข้น	15
2-2	กระบวนการแพร่เชิงกล	16
2-3	กระบวนการแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์	17
2-4	การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ภายใต้สภาวะคงที่	22
2-5	การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ภายใต้สภาวะระดับน้ำเปลี่ยนแปลง	23
2-6	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์บ่อสูบน้ำ ด้วยวิธีของทีส	26
2-7	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์บ่อสูบน้ำด้วยวิธีของคูเปอร์-จาคอบ	27
2-8	ไอโซเทอร์มเชิงเส้น	30
2-9	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำในชั้นน้ำบาดาล	31
2-10	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำในชั้นน้ำบาดาล	32
3-1	ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน	34
3-2	ขนาดคละของดินตัวอย่าง	36
3-3	การจำแนกชนิดของดินตามมาตรฐานต่างๆ	36
3-4	การจำแนกชนิดของดิน	37
3-5	ลักษณะดินทดลองชุดที่ 1	37
3-6	ลักษณะดินทดลองชุดที่ 2	38
3-7	ลักษณะดินทดลองชุดที่ 3	38
3-8	เครื่องวัดความนำไฟฟ้า	43
3-9	เครื่องยูวี-วิซิเบิล	45
3-10	เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง	45
3-11	เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี	46
3-12	หลักการทำงานเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี	47
3-13	ขวดมีฝาปิดขนาด 100 มิลลิลิตร	48
3-14	เครื่องกวนผสมแบบหมุนวน	49
3-15	คอลัมน์และฝาปิดคอลัมน์	49

รูปที่		หน้า
3-16	เครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบ	50
3-17	เครื่องมือเก็บตัวอย่างอัตโนมัติและหลอดเก็บตัวอย่าง	51
3-18	ขวดแก้วสีชาใช้เก็บตัวอย่างสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ	51
3-19	การบรรจุดินในคอลัมน์ด้วยวิธีบรรจุดินภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ	52
3-20	การไล่ฟองอากาศด้วยเครื่องหมุนวน	53
3-21	ไดอะแกรมชุดทดลอง	54
3-22	ชุดอุปกรณ์การทดลอง	54
3-23	ความเข้มรังสีของสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.	59
3-24	ค่าความเข้มรังสีของสารละลายเบนซีนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าความเข้มรังสีของสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร...	60
3-25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีจากการวัดด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิลกับค่าขนาดคลื่นจากการวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีของสารเบนซีนที่ความเข้มข้นต่างๆ	60
3-26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีจากการวัดด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิลกับค่าขนาดคลื่นจากการวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีของสารไตรคลอโรเอธิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ	61
3-27	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง UTCHEM	62
3-28	แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการ	63
4-1	ความเข้มข้นของสารเทรเซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 1	68
4-2	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 1	68
4-3	ความเข้มข้นของสารเทรเซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 2	69
4-4	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 2	69
4-5	ความเข้มข้นของสารเทรเซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 3	70
4-6	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินทดลองชุดที่ 3	70
4-7	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์ที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1	71
4-8	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์ที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 2	71
4-9	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์ที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 3	72

รูปที่		หน้า
4-10	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์ ณ เวลาต่างๆกันด้วยดินชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	72
4-11	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์ ณ เวลาต่างๆกัน ด้วยดินชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหลสูง 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	73
4-12	ความเข้มข้นของสารเบนซีน ณ เวลาต่างๆ	75
4-13	ความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอธิลีน ณ เวลาต่างๆ	75
4-14	เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 1 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	80
4-15	เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 1 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	80
4-16	เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 1 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	81
4-17	เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 1 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	81
4-18	เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 2 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	82
4-19	เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 2 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	82
4-20	เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 2 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	83

รูปที่ หน้า

4-21 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีน เมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 2 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 83

4-22 เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 3 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 84

4-23 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 3 ภายใต้อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 84

4-24 เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 3 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 85

4-25 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ดินทดลองชุดที่ 3 ภายใต้อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 85

4-26 ความเข้มข้นของสารเบนซีนในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ณ เวลาต่างๆที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 87

4-27 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเบนซีนที่ปริมาตรช่องว่างของดินทดลองทั้ง 3 ชุดที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 87

4-28 ความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอธิลีนในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ณ เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 88

4-29 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนที่ปริมาตรช่องว่างของดินทดลองทั้ง 3 ชุดที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 88

4-30 ความเข้มข้นของสารเบนซีนในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ณ เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 89

รูปที่ หน้า

4-31 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารเบนซีนที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 89

4-32 ความเข้มข้นของไตรคลอโรเอธิลีนในดินทั้ง 3 ชุด ณ.เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 90

4-33 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารไตรคลอโรเอธิลีนที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองทั้ง 3 ชุด ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 90

4-34 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 91

4-35 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 91

4-36 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 92

4-37 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 92

4-38 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 93

4-39 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 93

รูปที่ หน้า

4-40 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 94
4-41 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 94
4-42 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 95
4-43 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 95
4-44 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาต่างๆ ผ่านดินทดลองชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 96
4-45 เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 96
4-46 กริดเซลล์แบบจำลองกายภาพ..... 101
4-47 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารเบนซีนในดินชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 106
4-48 ผลการจำลองและผลการทดลองของสาไตรคลอโรเอธิลีนในดินชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 106
4-49 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารเบนซีนในดินชุดที่ 1ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 107
4-50 ผลการจำลองและผลการทดลองของสารไตรคลอโรเอธิลีนในดินชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 107

รูปที่		หน้า
4-51	ผลการจำลองและผลการทดลองของสารเบนซีนในดินชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	108
4-52	ผลการจำลองและผลการทดลองของสารไตรคลอโรเอธิลีนในดินชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	108
4-53	ผลการจำลองและผลการทดลองของสารละลายเบนซีนในดินชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	109
4-54	ผลการจำลองและผลการทดลองของสารไตรคลอโรเอธิลีนในดินชุดที่ 2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	109
4-55	ผลการจำลองและผลการทดลองของสารเบนซีนในดินชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	110
4-56	ผลการจำลองและผลการทดลองของสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนในดินชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	110
4-57	ผลการจำลองและผลการทดลองของสารเบนซีนในดินชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	111
4-58	ผลการจำลองและผลการทดลองของสารไตรคลอโรเอธิลีนในดินชุดที่ 3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	111

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Molecular Diffusion	กระบวนการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากกว่าไปสู่สารละลายในบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า
Mechanical Dispersion	กระบวนการผสมของสารละลายกับน้ำใต้ดินขณะที่ไหลผ่านตัวกลางรูพรุน การผสมนี้จะเกิดขึ้นตามแนวเส้นทางการไหลของน้ำใต้ดิน
Hydrodynamic Dispersion	ประกอบด้วยกระบวนการย่อย 2 ส่วนคือ กระบวนการแพร่เชิงกล (Mechanical Dispersion) และกระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างความเข้มข้น (Molecular Diffusion)
Retardation Factor	เป็นค่าที่แสดงถึงความหน่วงต่อการไหลของสารปนเปื้อนเนื่องมาจากสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินสามารถถูกดูดซับโดยกระบวนการดูดซับติดผิว (Sorption) โดยเม็ดของดินที่ประกอบในชั้นน้ำใต้ดิน ส่งผลให้การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนเป็นไปได้ช้าลงเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน (ค่า R_f ของน้ำมีค่าเท่ากับ 1)
Nonaqueous Phase Liquid	สารประกอบคาร์บอนที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำหรือมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ มีตัวย่อคือ NAPL
Breakthough Curve	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างน้ำที่เก็บรวบรวมจากคอลัมภ์ (แกน Y) กับเวลาที่ดำเนินการทดลอง (แกน X) มีตัวย่อคือ BTC
Normalized BTC	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างน้ำที่เก็บรวบรวมจากคอลัมภ์ (C) ต่อความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้น (C_0) (แกน Y) กับเวลาที่ดำเนินการทดลอง (แกน X)
Mean Residence Time	ค่าเวลาเฉลี่ยที่สารปนเปื้อนใช้เดินทางผ่านตัวกลางรูพรุน
Volatile Organic Compounds	สารอินทรีย์ระเหย มีตัวย่อคือ VOCs
Concentration C_0	ความเข้มข้นสารละลายก่อนเข้าคอลัมภ์
Concentration C	ความเข้มข้นสารละลายผ่านคอลัมภ์