

การศึกษาพฤติกรรมในระดับห้องปฏิบัติการและจำลองลักษณะการชะละลายและการเคลื่อนที่
ของไนเตรทในระบบชั้นน้ำใต้ดินอิมตัว



นายรัชพล พิพิธสมบัติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LABORATORY-SCALED INVESTIGATIONS AND NUMERICAL MODELING OF NITRATE
LEACHING AND TRANSPORT CHARACTERISTICS IN SATURATED AQUIFER
SYSTEMS



Mr.Ratchapon Pipitsombat

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาพฤติกรรมในระดับห้องปฏิบัติการและจำลอง
ลักษณะการชะละลายและการเคลื่อนที่ของในเตรทในระบบ
ชั้นน้ำใต้ดินอิมตัว

โดย

นายรัชพล พิพิธสมบัติ

สาขาวิชา

วิศวกรรมแหล่งน้ำ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

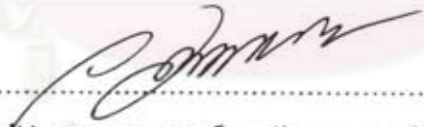
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อักษรา พุทธิวิทยา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนირงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาไรจน์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักษรา พุทธิวิทยา)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิสา สมิตถากร)


รัชพล พิพิธสมบัติ : การศึกษาพฤติกรรมในระดับห้องปฏิบัติการและจำลองลักษณะการชะละลาย และการเคลื่อนที่ของ ไนเตรทในระบบชั้นน้ำใต้ดินอิ่มตัว. (LABORATORY-SCALED INVESTIGATIONS AND NUMERICAL MODELING OF NITRATE LEACHING AND TRANSPORT CHARACTERISTICS IN SATURATED AQUIFER SYSTEMS)
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. อักษรา พุทธิวิทยา, 223 หน้า.

ไนเตรทที่เกิดจากธรรมชาติ และกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เป็นสาเหตุที่ทำให้ดิน และน้ำใต้ดินเกิดการปนเปื้อน เมื่อนำน้ำที่มีการปนเปื้อนมาอุปโภค และบริโภคทำให้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ คือพิษของไนเตรททำให้เกิดโรคที่เรียกว่า Methemoglobinemia หรือ Blue-Baby-Syndrome อาการของโรคนี้เกิดเมื่อระดับของฮีโมโกลบินในเลือดต่ำ ทำให้ไม่สามารถที่จะรับเอาออกซิเจนได้อย่างเพียงพอ ความรุนแรงของไนเตรททำให้เกิดการปนเปื้อนในดินและชั้นน้ำใต้ดินในจังหวัดสุพรรณบุรี ซึ่งถูกพบว่ามีการใช้ปุ๋ยในปริมาณมากเกินความจำเป็น

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นสำรวจวิจัยและศึกษาการปนเปื้อนของไนเตรทในดินและชั้นน้ำใต้ดินแบบไม่อิ่มตัวที่มีศักยภาพในการถูกชะละลายและก่อให้เกิดการปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา การศึกษาได้เก็บตัวอย่างตัวกลางรูพรุนจากพื้นที่ศึกษาจำนวน 14 ตัวอย่างและจำแนกชุดดินออกเป็น 3 กลุ่ม เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าไนเตรทในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้แบบจำลองแบบคอลัมน์ ผลการทดลองพบว่าไนเตรทสามารถถูกชะล้างออกมาจากตัวกลางรูพรุนมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ พฤติกรรมการดูดซับของไนเตรทจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ กับตัวกลางรูพรุนที่นำมาทดลอง ทำให้เกิดลักษณะของ เทลลิงเอฟเฟค มีลักษณะหางที่ยาวเป็นผลกระทบของแบบคิฟพิวชัน ข้อมูลจากแบบจำลองกายภาพจะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองคณิตศาสตร์ MODFLOW และ MT3D

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ....
 สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ....
 ปีการศึกษา ...2553...

ลายมือชื่อนิติศ.....วัชพล พิพิธสมบัติ.....
 ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....


5070419221 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS: GROUNDWATER CONTAMINATION / NITRATE / COLUMN LEACHING TESTS / CONTAMINANT TRANSPORT / MIGRATION

RATCHAPON PIPITSOMBAT: LABORATORY-SCALED INVESTIGATIONS AND NUMERICAL MODELING OF NITRATE LEACHING AND TRANSPORT CHARACTERISTICS IN SATURATED AQUIFER SYSTEMS. ADVISOR: AKSARA PUTTHIVIDHYA Ph.D., 223 pp.

Nitrate, from both natural and human activities, is a common soil and groundwater contaminant. The immediate health effect is methemoglobinemia (Blue-Baby-Syndrome) in which the reduction of nitrate in the digestive tract by nitrate-reducing bacteria and nitrite combines with the hemoglobin that carries oxygen forming methemoglobin which cannot carry oxygen. Severe nitrate enrichment in soil and shallow groundwater aquifers in Suphanburi was discovered owing to the intensive farming with excess fertilization.

This research emphasizes to explore and study contaminated of nitrate in soil and unsaturated groundwater aquifers that has latency in leached and contaminated in groundwater in study area. The possibility of nitrate leachate and transport into soil water in 14 samples representing 3 porous media groups from the study area (mainly near agricultural fields) was analyzed for NO_3^- -N and examined by laboratory-scaled column transport experiments. The results indicted that significant amounts of NO_3^- (> 90%) could be leached. Pore exclusion was also observed based on the early nitrate breakthrough. Gradual sorption behavior of nitrate was experienced in all soil samples tested, resulting in the maximum normalized nitrate concentration of less than unity. Even longer tailing effects were observed, especially in soil samples S3 and S8, suggesting a significant back diffusion of nitrate into pore water. The observed data were used in MODFLOW and MT3D model.

Department :.....Water Resources Engineering.....

Student's Signature: Ratchapon Pipitsombat

Field of Study :.....Water Resources Engineering.....

Advisor's Signature:

Academic Year : ..2010..

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อักษรา พฤทธิวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่าง ๆ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง ในการทำวิทยานิพนธ์แก่ข้าพเจ้าให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรณจิต ลิขิตเดชาโรจน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุณิสา สมิตถากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำชี้แนะและตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ทำการวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ และภาควิชาปฐพี กถศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ บุคลากร เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองต่าง ๆ ขอขอบพระคุณกรมทรัพยากรน้ำบาดาล และ บริษัทเมทริกซ์ แอสโซซิเอทส์ จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ คุณเกรียงศักดิ์ มานะจิตต์ คุณสุวิชัย รอดภัย และคุณชัยวัฒน์ รงค์สยามานนท์ ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณคุณวันวิสา มะมา และคุณอารักษ์ เขียวแก้ว เพื่อนร่วมชั้นเรียน และขอขอบพระคุณอาจารย์ เพื่อน พี่ และน้อง จากสำนักกลาง นักเรียนคริสเตียนทุกคนที่คอยให้ข้อคิด คำหนุนใจ และคำแบ่งปันต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์มากให้ ข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องทุก ๆ คน ของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้ความรัก ความห่วงใยและติดตามการทำวิทยานิพนธ์อย่างใกล้ชิด คอยสนับสนุนการศึกษาให้ข้าพเจ้ามาโดยตลอด คอยเป็นที่ยึดเหนี่ยวจิตใจและทำให้เกิดกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จ ประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้ผู้ที่สนใจได้นำไปศึกษาต่อไปในภายภาคหน้า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	5
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	5
1.4 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
1.5 ภาพรวมแนวทางการศึกษา.....	11
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	15
2.1 แหล่งน้ำใต้ดิน.....	15
2.2 มลภาวะน้ำใต้ดิน.....	16
2.3 ลักษณะการใช้น้ำและการปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดิน.....	16
2.4 แหล่งกำเนิดของมลภาวะน้ำใต้ดิน.....	17
2.4.1 แหล่งและสาเหตุของมลภาวะ.....	18
2.4.2 การปนเปื้อนในตรรกในแหล่งน้ำบาดาลของประเทศไทย.....	19
2.5 สมการการไหลของน้ำใต้ดิน.....	22
2.6 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน.....	23
2.7 การทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน.....	36
2.8 แบบจำลองคณิตศาสตร์.....	37
2.8.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ MODFLOW.....	37
2.8.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D.....	42

บทที่ 3 แบบจำลองกายภาพและแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	46
3.1 แบบจำลองทางกายภาพ.....	46
3.1.1 ลักษณะตัวกลางรูปทรงแบบการเตรียมตัวอย่างสารสำหรับการทดลอง....	46
3.1.2 การวัดความนำไฟฟ้า ความเข้มข้นเกลือคลอไรด์และวัดความเข้มข้น ไนเตรท.....	51
3.1.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	52
3.1.4 สารเคมี.....	54
3.1.5 วิธีการทดลอง.....	55
3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์.....	62
3.2.1 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของการเคลื่อนที่ของไนเตรทผ่านตัวกลาง รูปทรงแบบอิมิตัวในระดับห้องปฏิบัติการ.....	63
3.2.2 ข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการคาดการณ์แพร่กระจายของไนเตรท ในชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาในระดับ Field Scale.....	64
บทที่ 4 ผลการศึกษาแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	70
4.1 ผลการศึกษาจากแบบจำลองทางกายภาพ.....	70
4.1.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมของเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูปทรงแบบอิมิตัวด้วยน้ำ.....	70
4.1.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของไนเตรทผ่านตัวกลางรูปทรงแบบอิมิตัวด้วยน้ำ.....	74
4.1.3 ผลการทดลองการวิเคราะห์พฤติกรรมการชะละลายของไนเตรทจาก ชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินแบบอิมิตัว.....	85
4.2 ผลการศึกษาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	88
4.2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D.....	89
4.2.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของไนเตรทด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D.....	99
4.2.3 ผลการจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ ศึกษาในระดับ Field Scale.....	100

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	109
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	109
5.2 แนวทางการบำบัดการปนเปื้อนไนเตรท.....	112
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	113
รายการอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก.....	119
ก การหาขนาดเม็ดดินก่อนการทดลอง.....	120
ข การหาค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อน.....	151
ค การหาปริมาณไนเตรท ณ เวลาต่าง ๆ.....	165
ง ตารางแสดงผลการทดลอง Leaching test.....	178
จ การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ.....	185
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	223

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึ่มได้ในดินแต่ละชนิด..... 24
2-2	ค่าของ $W(u)$ ที่ค่าต่าง ๆ ของ u 30
2-3	ความพรุนของดินแต่ละชนิด..... 33
2-4	รายละเอียดของชุดการคำนวณต่าง ๆ ของแบบจำลอง MODFLOW..... 38
2-5	องค์ประกอบของโมดูลต่าง ๆ ตามขั้นตอนการจัดการในแต่ละชุดการคำนวณ..... 39
2-6	รายละเอียดของชุดการคำนวณต่าง ๆ ของแบบจำลอง MT3D..... 43
3-1	ขนาดคละของดินที่ไม่มีการปนเปื้อนในเตรท..... 48
3-2	ขนาดคละของดินที่มีการปนเปื้อนในเตรท..... 49
3-3	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลอง..... 59
3-4	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองการปนเปื้อนของไนเตรทในพื้นที่ศึกษา..... 69
4-1	ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารเทรเซอร์ก่อนเข้าคอลัมน์ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลอง..... 70
4-2	ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทรเซอร์ผ่านตัวอย่างดินทดลอง..... 74
4-3	ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางและความเข้มข้นก่อนเข้าคอลัมน์ของไนเตรทในชุดการทดลอง..... 82
4-4	ค่าตัวประกอบความหน่วงของดินในแต่ละชุดการทดลอง..... 83
4-5	แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรทที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์..... 84
4-6	แสดงการชะล้างของไนเตรทจากการทดลองการชะละลายของไนเตรท..... 85
4-7	แสดงปริมาณไนเตรทที่ตกค้างในดินจากการทดลองคอลัมน์..... 86
4-8	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D..... 91
4-9	สัมประสิทธิ์การแพร่ที่สุ่มลงในแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination (R Square))..... 92
4-10	การปรับสัมประสิทธิ์การแพร่ของบ่อที่มีการปนเปื้อนเพื่อปรับเทียบค่าการปนเปื้อนไนเตรท..... 101

สารบัญภาพ

ฉ

รูปที่		หน้า
1-1	ปริมาณไนเตรทที่ตรวจพบจากแหล่งน้ำใต้ดินของจังหวัดกาญจนบุรีและ สุพรรณบุรี.....	4
1-2	ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา.....	14
2-1	การใช้น้ำเพื่อการเกษตรและผลต่อคุณภาพน้ำ.....	17
2-2	แหล่งมลพิษจากการชลประทาน.....	18
2-3	แสดงปริมาณไนเตรทและโพแทสเซียมในแหล่งน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อน.....	20
2-4	วัฏจักรของไนโตรเจน	21
2-5	การไหลของน้ำในมวลดินระหว่างจุด 2 จุด.....	25
2-6	การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ภายใต้สภาวะคงที่.....	27
2-7	การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ภายใต้สภาวะระดับน้ำเปลี่ยนแปลง... ..	28
2-8	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์บ่อสูบน้ำ ด้วยวิธีของทีส.....	31
2-9	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์บ่อสูบน้ำด้วยวิธีของคูเปอร์-จาคอบ.....	32
2-10	ไอโซเทอร์มเชิงเส้น.....	35
2-11	ลักษณะการกระจายของเม็ดดินในมวลดิน.....	37
2-12	โครงสร้างของโปรแกรมหลักของแบบจำลอง MODFLOW	41
2-13	โครงสร้างของโปรแกรมหลักของแบบจำลอง MT3D.....	44
3-1	ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน.....	47
3-2	ขนาดคละของดินตัวอย่างที่ไม่มีการปนเปื้อนไนเตรท.....	48
3-3	ขนาดคละของดินตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนไนเตรท.....	49
3-4	การแบ่งชนิดดินโดยระบบ Unified Soil Classification.....	50
3-5	ลักษณะดินตัวอย่างชุดที่ 1.....	50
3-6	ลักษณะดินตัวอย่างชุดที่ 2.....	50
3-7	ลักษณะดินตัวอย่างชุดที่ 3.....	50
3-8	ลักษณะดินตัวอย่างชุดที่ 4.....	50
3-9	ลักษณะดินตัวอย่างชุดที่ 5.....	51
3-10	ลักษณะดินตัวอย่างชุดที่ 6.....	51
3-11	เครื่องวัดความนำไฟฟ้า Microprocessor Conductivity Meter.....	51
3-12	เครื่องวัดความเข้มข้นไนเตรท Nitrate Iron Selective Electrode.....	52

รูปที่	หน้า
3-13	คอลลัมน์และฝาปิดคอลลัมน์..... 53
3-14	เครื่องสูบน้ำและกระบอกฉีดน้ำแรงดันสูงเมื่อประกอบเข้าด้วยกัน..... 53
3-15	หลอดแก้วเก็บตัวอย่างสาร..... 54
3-16	ขวดมีฝาปิดสำหรับเก็บสารละลายในเตรท..... 55
3-17	การบรรจุดินในคอลลัมน์..... 56
3-18	ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์การทดลองการเคลื่อนตัวของเทอร์เซอร์และไนเตรทผ่าน ตัวกลางรูพรุนในระดับห้องปฏิบัติการ..... 56
3-19	ชุดอุปกรณ์การทดลองการเคลื่อนตัวของเทอร์เซอร์และไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุน ภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ..... 57
3-20	แผนภาพแสดงการแบ่งตัวอย่างดินจากคอลลัมน์เพื่อนำมาหาประมาณไนเตรทที่ ตกค้างในคอลลัมน์..... 61
3-21	แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการ..... 63
3-22	ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา อำเภออุ้มทอง จังหวัดสุพรรณบุรี..... 65
3-23	บริเวณ อ.อุ้มทอง จ.สุพรรณบุรี การกำหนดขนาดกริดในแบบจำลอง MODFLOW และMT3D..... 66
3-24	แสดงการเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองและระดับน้ำที่ได้จากบ่อ สังเกตการณ์..... 67
3-25	เปรียบเทียบระดับน้ำจากการคำนวณในแบบจำลองคณิตศาสตร์กับระดับน้ำจาก บ่อสังเกตการณ์เดือน มีนาคม 2552..... 68
4-1	กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง ชุดที่ 1(S2) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 71
4-2	กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง ชุดที่ 2(S3) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 71
4-3	กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง ชุดที่ 3(S8) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 72
4-4	กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1-3ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง..... 72

รูปที่	หน้า
4-33 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.20 เซนติเมตร.....	97
4-34 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.25 เซนติเมตร.....	97
4-35 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.32 เซนติเมตร.....	97
4-36 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.50 เซนติเมตร.....	98
4-37 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.57 เซนติเมตร.....	98
4-38 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.60 เซนติเมตร.....	98
4-39 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของไนเตรทที่ได้จากพื้นที่จริงกับแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	102
4-40 เปรียบเทียบความเข้มข้นของไนเตรทที่เก็บได้จากพื้นที่ศึกษากับค่าที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	103
4-41 การแพร่กระจายของไนเตรทในพื้นที่ศึกษาที่เวลา 3 ปี.....	104
4-42 การแพร่กระจายของไนเตรทในพื้นที่ศึกษาที่เวลา 10 ปี.....	105
4-43 การแพร่กระจายของไนเตรทในพื้นที่ศึกษาที่เวลา 20 ปี.....	106
4-44 การแพร่กระจายของไนเตรทในพื้นที่ศึกษาที่เวลา 30 ปี.....	107
4-45 การแพร่กระจายของไนเตรทในพื้นที่ศึกษาที่เวลา 50 ปี.....	108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสารเคมีจำนวนมากเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ในด้านต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบหรือปรุงแต่งอาหาร ยารักษาโรค เครื่องสำอาง ใช้เป็นสารเคมีป้องกันการกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ และใช้ในกระบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรม สารเคมีต่าง ๆ ที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์เหล่านี้ ได้มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ทำให้สภาพแวดล้อมและสุขภาพเสื่อมโทรมลง

ในปัจจุบันประชากรกว่า 1.1 พันล้านคนทั่วโลก (UNEP 2002) กำลังเผชิญกับปัญหาการเข้าถึงน้ำดื่มที่สะอาดและปลอดภัย เฉพาะในภูมิภาคเอเชียเพียงอย่างเดียว พบสถิติการเสียชีวิตของทารกสูงถึง 500,000 รายต่อปี เนื่องจากการขาดแคลนน้ำดื่มที่สะอาดในปริมาณที่เพียงพอ (UNEP 2002) การเกษตรกรรมแบบอุตสาหกรรมที่เร่งเร้าให้มีการใช้ปุ๋ยปริมาณมากเกินไปจนเกินความจำเป็น ซึ่งเป็นภัยคุกคามแหล่งน้ำสะอาดทั่วโลก โดยพบว่าแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมมีคุณภาพเสื่อมโทรมลงเนื่องจากปนเปื้อนด้วยปุ๋ยและสารเคมีเกษตร (Scanlon et al. 2007) ปุ๋ยที่เหลือจากกิจกรรมทางการเกษตรถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำผิวดินทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Algal Bloom ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น ๆ ตายลงเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยในปริมาณมากเกินไปจะก่อให้เกิดการสะสมของปุ๋ยที่เหลือในดิน ทำยสุดปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ก่อให้เกิดมลพิษต่อแหล่งน้ำดื่มที่สำคัญของประชาชน น้ำดื่มที่ปนเปื้อนด้วยไนเตรทในปริมาณสูงสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพโดยเฉพาะในเด็ก เมื่อพิจารณาในช่วง 40 ปีที่ผ่านมาพบว่าทั่วโลกมีการใช้ปุ๋ยสูงขึ้นกว่า 700 % ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้คุณภาพน้ำเสื่อมโทรมลง (Camargo and Alonso 2006)

พฤติกรรมการใช้ปุ๋ยที่มากเกินไปจนเกินความจำเป็นดังกล่าวข้างต้นนำไปสู่การปนเปื้อนของสารไนเตรทในสิ่งแวดล้อม ปุ๋ยที่เกษตรกรใส่ในปริมาณมหาศาลกลับพบว่าพืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ทั้งหมด กว่าครึ่งหนึ่งของปุ๋ยที่ใส่ลงไปสูญหายไปเนื่องจากการชะล้างโดยกระแสลมหรือเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์และปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ปริมาณการใช้ปุ๋ยเพื่อการเพาะปลูกพืชจำพวกธัญพืช เช่น ข้าว พบว่าธัญพืชใช้ปุ๋ยเพื่อการเจริญเติบโตเพียงแค่ 33 % ของปุ๋ยที่ใส่ลงไปทั้งหมด ที่เหลือกว่า 67 % ต้องสูญเสียนอกจากนี้ยังปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การชะล้างพังทลายของหน้าดิน การระเหยกลายเป็นไอ การกัดเซาะ กระบวนการปลดปล่อยไนโตรเจนของพืช และ กระบวนการดีไนตริฟิเคชันในดิน (Soil Denitrification) (Raun and Johnson 1999)

อย่างไรก็ตามอัตราการใช้น้ำปุ๋ยอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องของหลายประการ เช่น ลักษณะพื้นที่ ชนิดของพืชที่ปลูก และรูปแบบของการทำเกษตร เป็นต้น ในประเทศไทยพบว่าการเพาะปลูกพืชบางชนิดมีอัตราการใช้น้ำปุ๋ยสูงกว่าอัตราการใช้น้ำปุ๋ยเฉลี่ยของประเทศ เช่น ข้าว ซึ่งมีการเพาะปลูกมากในจังหวัดนครปฐม กาญจนบุรี และสุพรรณบุรี ซึ่งพบว่ามีอัตราการใช้น้ำปุ๋ยสูงถึง 1,000 กิโลกรัมต่อเฮกตาร์ (160 กิโลกรัมต่อไร่) และพบว่ามีเพียง 5 % ของปุ๋ยที่ใส่ทั้งหมดเท่านั้นที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ที่เหลือสูญเสียไปเนื่องจากการชะล้างของดิน น้ำ และอากาศ (Phupaibul et al. 2004)

พิษของไนเตรททำให้เกิดโรคที่เรียกว่า Blue-Baby-Syndrome หรือMethemoglobinemia และมักเกิดในเด็กทารกที่อายุต่ำกว่า 4 เดือน ที่ดื่มน้ำที่ปนเปื้อนไนเตรทในปริมาณสูง (Greer et al. 2005) อาการของ Blue-Baby Syndrome เกิดขึ้นเมื่อระดับของฮีโมโกลบินในเลือดต่ำทำให้ไม่สามารถที่จะรับเอาออกซิเจนได้อย่างเพียงพอ ซึ่งทำให้ผู้ป่วยเป็นลมหมดสติและอาจเสียชีวิตได้ อาการดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากไนเตรท (เมื่อระดับ pH สูงทำให้แบคทีเรียในลำไส้สามารถเปลี่ยนรูปของไนเตรทเป็นไนไตรท์ได้มากขึ้น โดยไนไตรท์สามารถถูกดูดซับและรวมตัวกับฮีโมโกลบิน เป็นเมทีโมโกลบินซึ่งส่งผลทำให้การลำเลียงออกซิเจนลดลง) ขัดขวางการทำงานของฮีโมโกลบินในเลือด (Townsend et al. 2003)

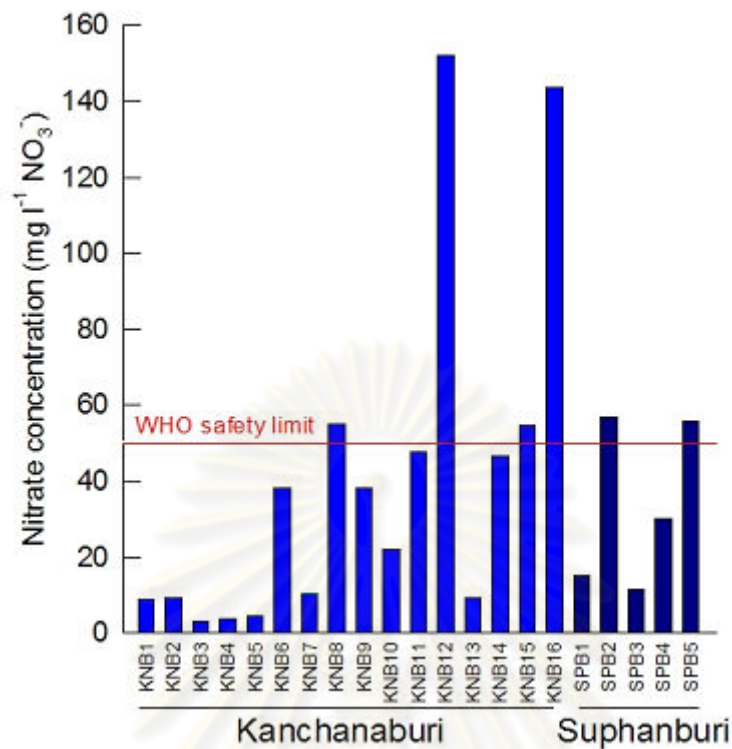
มีงานวิจัยที่บ่งชี้ว่าพบการสะสมของสารไนโตรซามีน (Nitrosamines) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogens) ตัวหนึ่ง (ไนโตรซามีนเกิดจากการเปลี่ยนรูปของไนเตรท) เนื่องจากการดื่มน้ำที่ปนเปื้อนไนเตรทในปริมาณที่ต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งองค์การอนามัยโลกระบุว่าเป็นระดับที่ปลอดภัยเป็นระยะเวลานาน (Chui and Tsai 2007) ตัวอย่างเช่น ในรัฐไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าน้ำดื่มจากชุมชนที่มีไนเตรทปนเปื้อนสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลกทำให้เกิดโรคมะเร็งรังไข่ในผู้หญิงที่ดื่มน้ำดังกล่าว (Beman et al. 2005) และ มีการศึกษาในประเทศได้ค้นพบว่าการดื่มน้ำที่ปนเปื้อนไนเตรทในปริมาณสูง เพิ่มความเสี่ยงในการเป็นโรคมะเร็งกระเพาะปัสสาวะได้ (Townsend et al. 2003)

การหมุนเวียนของไนโตรเจนเริ่มจากในบรรยากาศ ไนโตรเจนจะถูกออกซิไดซ์โดยแบคทีเรียแบคทีเรียนำมาใช้ เพื่อสร้างอวัยวะและเจริญเติบโต เมื่อแบคทีเรียตายจะเกิดการย่อยสลายปล่อย NH_3 ออกมา จากนั้นกระบวนการไฮโดรไลซิสจะทำให้ NH_3 เปลี่ยนมาอยู่ในรูปของ NH_4^+ บางส่วนถูกออกซิไดซ์โดยแบคทีเรียที่ชื่อว่าไนโตรโซโมนาส และไนโตรแบคทีเรีย ทำให้ได้สารประกอบไนไตรท์และไนเตรท ไนโตรเจนส่วนน้อยจากเนื้อเยื่อของพืชซึ่งถูกทับถมอยู่ในตะกอนและกลายเป็นส่วนหนึ่งของหินตะกอน เมื่อกลายเป็นหินจะอยู่ในรูปของ NH_4^+ โดยการแทนที่ K^+ ในดินเหนียว และไมกา ปริมาณไนโตรเจนในหินตะกอนมีค่าระหว่าง 200 – 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอินทรีย์ที่ทับถมอยู่ในขณะที่เกิดหินตะกอนนั้น ส่วนหินอัคนี

และหินแปรจะพบ ไนโตรเจนและไมกานในปริมาณน้อยมาก ระหว่าง 1 – 20 มิลลิกรัมต่อลิตร การสูญเสียไนโตรเจนในอากาศมีทางอื่นอีก แต่เป็นปริมาณเล็กน้อย เช่น มีการนำไปทำปุ๋ย การเผาผลาญของเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ไนโตรเจนกลายเป็นไนตริกออกไซด์ซึ่งจะไปลดปริมาณไอออน ทำให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเพิ่มขึ้นที่ผิวโลก และจะก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนังเพิ่มขึ้น

ไนโตรเจนในดินมีปริมาณน้อยและสูญเสียได้โดยการระบายน้ำ บางส่วนอยู่ในรากพืชตระกูลถั่วและสิ่งมีชีวิตในดิน ไนโตรเจนในดินจะเป็นตัวควบคุมปริมาณไนเตรทในน้ำบาดาล ไนโตรเจนบางส่วนถูกพืชดูดไปใช้ บางส่วนถูกน้ำพาซึมลึกลงไป ไนเตรทจะกระจายตัวอยู่ในชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และในชั้นน้ำบาดาล แต่ส่วนมากจะอยู่ในชั้นที่เรียกว่าวาโดส (Vadose Zone) ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณภาพน้ำบาดาล บริเวณใดที่มีโอกาสเกิดดีไนตริฟิเคชันสูง ไนเตรทที่ถูกชะล้างลงไปจะน้อยลง นอกจากนี้ลักษณะการกระจายตัวของไนเตรทจะอยู่ภายใต้การควบคุมของการไหลของน้ำที่ถูกเพิ่มเติมลงไปในดิน และปริมาณของพืชที่นำไปใช้ อย่างไรก็ตามไนเตรทส่วนใหญ่จะอยู่ในดินช่วง 0-1 เมตร การชะล้างลงไปยิ่งที่ลึกมักเกิดในช่วงเวลาที่ค่อนข้างคงที่ในแต่ละปี เช่น อาจจะเป็นช่วงหลังจากที่พืชดูดไปใช้ในการสร้างอาหารก่อนเกิดดีไนตริฟิเคชัน หรือช่วงหลังฝนตก ปริมาณไนเตรทในน้ำบาดาลมีสาเหตุการปนเปื้อนจากภายนอก ได้แก่ การใช้ปุ๋ยในการเพาะปลูก การปล่อยของเสียจากคนและสัตว์ ของเสียจากชุมชนหรือโรงงาน เป็นต้น

การศึกษาของ กรีนพีซ (2550) เรื่องไนเตรทกับคุณภาพน้ำใต้ดินในประเทศไทย โดย Reyes Tirado นักวิทยาศาสตร์จากศูนย์วิจัยและทดลองของกรีนพีซ มหาวิทยาลัยเอ็กเซ็ทเตอร์ ประเทศอังกฤษ ระบุว่า การใช้ปุ๋ยเพื่อการเกษตรในปริมาณมาก มีส่วนทำให้ไนเตรทปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำบาดาล ซึ่งเป็นแหล่งน้ำอุปโภคบริโภคของประชาชน ผลการศึกษาพบว่าแหล่งน้ำใต้ดินบริเวณ พื้นที่ทำการเกษตรกรรมมีมลพิษจากไนเตรทปนเปื้อนสูงมาก และสัมพันธ์กับพฤติกรรม การทำการเกษตรในรูปแบบอุตสาหกรรม ที่เน้นเร่งการผลิตโดยใส่ปุ๋ยเคมีในปริมาณที่มากเกินไป ความจำเป็น โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ภาคกลางอันได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี และสุพรรณบุรี ตัวอย่างจากบ่อน้ำบาดาลภายในแปลงปลูกหน่อไม้ฝรั่งในจังหวัดกาญจนบุรี เก็บตัวอย่างทั้งหมด 11 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบตัวอย่างที่ปนเปื้อนปริมาณไนเตรทสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลกที่กำหนดให้มีได้ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 6 ตัวอย่าง และผลการศึกษาคุณภาพน้ำน้ำใต้ดินจังหวัดสุพรรณบุรี จำนวน 5 ตัวอย่าง พบตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนไนเตรทจำนวน 2 ตัวอย่างในอำเภออู่ทอง ที่มีปริมาณไนเตรทสูงกว่าค่ามาตรฐาน การพบไนเตรทปนเปื้อนในแหล่งน้ำบาดาลบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมดังกล่าว ซึ่งกรณีนี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ปุ๋ยปริมาณมาก และการเกิดวิกฤตน้ำบาดาล ว่าการปนเปื้อนของไนเตรทในแหล่งน้ำบาดาลมักจะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีการใช้ปุ๋ยในปริมาณมาก สิ่งที่น่าวิตกกังวลมากคือ ทารกและผู้ที่ตั้งครรภ์จากพื้นที่ดังกล่าวอาจได้รับผลกระทบในระยะยาวต่อสุขภาพ เช่นโรคมะเร็ง



รูปที่ 1-1 ปริมาณไนเตรทที่ตรวจพบจากแหล่งน้ำใต้ดินของจังหวัดกาญจนบุรีและสุพรรณบุรี (กรีนพีซ 2550)

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นสำรวจวิจัยและศึกษาการปนเปื้อนของไนเตรทในดินและชั้นน้ำใต้ดินแบบไม่อิ่มตัวที่มีศักยภาพในการถูกชะละลายและก่อให้เกิดการปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา โดยการเก็บข้อมูลภาคสนามควบคู่ไปกับการพัฒนาแบบจำลองทางกายภาพแบบคอลัมน์เพื่อจำลองลักษณะชั้นน้ำใต้ดินภายใต้สภาพการไหลและ Recharge จริงของพื้นที่ศึกษา รวมทั้งศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของไนเตรทในตัวกลางพอร์นธรรมชาติ ภายใต้การไหลแบบอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Condition) โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพที่พัฒนาในห้องปฏิบัติการ และแบบจำลองคณิตศาสตร์ MODFLOW และ MT3D ผลการจำลองจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ที่มีอิทธิพลต่อลักษณะและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของไนเตรทในชั้นน้ำใต้ดิน แบบจำลองการเคลื่อนตัวของไนเตรทที่ปรับเทียบแล้วได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อคาดการณ์การแพร่กระจายของไนเตรทในแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาที่ระดับ Field Scale ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

- 1.สำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลดินและน้ำใต้ดินเพื่อศึกษาวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทในชั้นดินและชั้นน้ำไม่อิ่มตัวที่มีศักยภาพในการถูกชะละลายและก่อให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินอิ่มตัวภายใต้สภาวะการเติมน้ำ (Recharge Rate) ลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา
2. ศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของการกระจายตัวและการเคลื่อนตัวของไนเตรทในระบบชั้นน้ำใต้ดินแบบอิ่มตัว (Saturated Groundwater Flowing System) โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) แบบคอลัมน์
3. จำลองลักษณะและพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของไนเตรทผ่านระบบชั้นน้ำใต้ดินแบบอิ่มตัว (Saturated Groundwater Flowing System) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MODFLOW และMT3D
4. วิเคราะห์และคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ที่สำคัญต่อลักษณะและพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของไนเตรทในระบบชั้นน้ำใต้ดินแบบอิ่มตัว ได้แก่ ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อน ค่าการแพร่ และค่าตัวประกอบความหน่วง
5. คาดการณ์การแพร่กระจายของไนเตรทในชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาในระดับ Field Scale

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตของการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของไนเตรท โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MODFLOW และMT3D มีดังนี้

1. เลือกพื้นที่ใน อ.อุทุมพร จ.สุพรรณบุรี เป็นพื้นที่ศึกษา เนื่องจากมีหลักฐานการปนเปื้อนชั้นดิน และชั้นน้ำใต้ดินด้วยไนเตรท (กลุ่มกรีนพีซ 2550, กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2552)
2. เก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ศึกษาอย่างน้อย 14 ตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นตัวแทนของตัวกลางรูปพรุนในแบบจำลองทางกายภาพ
3. วิเคราะห์หาปริมาณสารปนเปื้อนที่ตกค้างในดินจากพื้นที่ศึกษา โดยใช้ Nitrate Ion Selective Electrode
4. พัฒนาแบบจำลองทางกายภาพแบบคอลัมน์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของการชะละลาย (Leaching) ของไนเตรทจากชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินแบบอิ่มตัว ดำเนินการทดลองโดยเลือกใช้ Recharge Rate ในช่วงค่าที่ใกล้เคียงกับ Recharge Rate จริงของพื้นที่ศึกษา
5. พัฒนาแบบจำลองทางกายภาพแบบคอลัมน์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะและพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ (Transport) ของไนเตรทในระบบชั้นน้ำอิ่มตัว ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นเท่ากับค่าความเข้มข้นของไนเตรทสูงสุดจากการชะละลายในขั้นตอนที่ 4

6. คำนวณค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของไนเตรทในระบบชั้นน้ำใต้ดินอิมิตัว ได้แก่ ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อน ค่าการแพร่ และค่าตัวประกอบความหน่วง เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้า (Input Parameters) สำหรับจำลองการเคลื่อนที่ของไนเตรทโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ MODFLOW และ MT3D ต่อไป

7. พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D เพื่อจำลองลักษณะและพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของไนเตรทในระบบชั้นน้ำใต้ดินแบบอิมิตัว เปรียบเทียบแบบจำลองโดยใช้ผลการทดลองที่ได้จากห้องปฏิบัติการโดยพิจารณาผลจากปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อลักษณะและพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของไนเตรทในระบบ

8. ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับเทียบแล้วเพื่อคาดการณ์การแพร่กระจายของไนเตรทในชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา ที่ระดับ Field Scale

1.4 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.1 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

1.4.1.1 การศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนชนิดต่าง ๆ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์

Gruenar and Shuval (1970) ได้ศึกษาหาปริมาณไนเตรทในชุมชนที่หนาแน่นในที่ราบภาคกลางและชายฝั่งทะเลด้านใต้ของอิสราเอล พบว่าบ่อน้ำประมาณ 180 บ่อ มีปริมาณไนเตรท สูงกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (มาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลกที่กำหนดให้มีได้ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร)

Reeves et al. (1974) ได้ศึกษาหาความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำใต้ดินทางตะวันตกของรัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย พบว่าค่าปริมาณไนเตรทอยู่ระหว่าง 12 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 62 มิลลิกรัมต่อลิตร

Robertson and Draycott (1948) ได้ศึกษาหาปริมาณไนเตรทในน้ำใต้ดินโดยเฉพาะจากบ่อขุด จากการสำรวจบ่อน้ำชนบทกว่า 2,000 บ่อ ใน Saskatchewan ประเทศแคนาดาพบว่าไนเตรทเกินกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละ 18.8 และเกินกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละ 5.3

Mikolajkow (2003) ได้ศึกษาค่าตัวประกอบความหน่วงของสารไนโตรเจนในดินประเทศโปแลนด์ จากการศึกษาค่าตัวประกอบความหน่วงในดินชนิดต่าง ๆ ที่นำมาศึกษามีค่าอยู่ที่ 1.17 – 26.54

Dario et al. (2007) ได้พัฒนาแบบจำลองทางกายภาพเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน และไนเตรท ในเมือง Piedmont ประเทศอิตาลี ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวได้ถูกเลือกมาเพราะว่ามีการทำฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดการปนเปื้อนของไนเตรทลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินจากของเสียที่ขับถ่ายออกมาจากสัตว์ จากการศึกษาพบว่ามีปริมาณไนเตรทปนเปื้อนในน้ำใต้ดินมากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (มาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลกที่กำหนดให้มีได้ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร)

1.4.1.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์

Torak et al. (1993) ได้พัฒนาแบบจำลอง Finite – element ในแบบ 2 มิติ เพื่อหาทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินและการปนเปื้อนของไนเตรท ในฤดูกาลต่าง ๆ ของแอ่ง Flint ทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศจอร์เจีย จากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic conductivity) อยู่ระหว่าง 0.0004 – 23 ฟุตต่อวัน

Debbie Warner Gordon and Dorothy F. Payne (2007) ได้ทำการศึกษาการใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินและไนเตรทบริเวณชั้นน้ำ Upper Floridan Aquifer ในพื้นที่ฝั่งตะวันตกเฉียงใต้ของ Albany, Georgia โดยใช้แบบจำลอง MODFLOW โดยแบบจำลองครอบคลุมพื้นที่ 1,500 ตารางไมล์ รอบพื้นที่บ่อสำรวจใน Albany ประเทศจอร์เจีย แบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือ Undifferentiated Overburden และ Upper Floridan Aquifer ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 0.0004 – 23 ฟุตต่อวัน และ 1,500 – 5,000 ฟุตต่อวัน ในแต่ละชั้นตามลำดับ โดยการเปรียบเทียบระดับน้ำใช้ข้อมูลระดับน้ำในพื้นที่ ปี 1999 จำนวน 162 บ่อ

Sirintad Kwanmeung, Charlle Navanugraha, Sura Pattanakiat, Chumlong Arunlertaree and Sumet Mettasar (2002) ได้ประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ในการประเมินความอ่อนไหวของที่ดินและน้ำใต้ดินต่อการปนเปื้อนของไนเตรทและฟอสเฟตจากฟาร์มสุกรในอำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม โดยทำการศึกษาปัจจัยทางกายภาพและสิ่งแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อความอ่อนไหวของที่ดินและน้ำใต้ดินต่อการปนเปื้อนของไนเตรทและฟอสเฟตจากฟาร์มสุกร โดยนำปัจจัยต่างๆ มาประเมินโดยใช้แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ทำการศึกษา DRASTIC Factors โดยการประเมินค่าคะแนนความสำคัญของ (Weighting) ความเหมาะสมของปัจจัยและค่าน้ำหนักคะแนน (Rating) ระดับของปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความอ่อนไหวของที่ดินและน้ำใต้ดินต่อการปนเปื้อนของไนเตรทและฟอสเฟตจากฟาร์มสุกร รวมทั้งการนำผลจากการสำรวจปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตซึ่งได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการมาจัดทำเป็นฐานข้อมูล แล้วจัดทำแผนที่แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทและ

ฟอสเฟตในดินและน้ำใต้ดิน ผลการศึกษาจากการประเมินความอ่อนไหวของที่ดินและน้ำใต้ดิน แบ่งระดับความอ่อนไหวของที่ดินและน้ำใต้ดินออกเป็น 5 ระดับ คือ พื้นที่ที่มีระดับความอ่อนไหวของที่ดินและน้ำใต้ดินต่อการปนเปื้อนของไนเตรทและฟอสเฟตจากฟาร์มสุกรต่ำมาก ต่ำ ปานกลาง สูงและสูงมาก

1.4.2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ

1.4.2.1 การศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนชนิดต่าง ๆ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์

เกรียงศักดิ์ มานะจิตต์ (2550) ศึกษาการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจำพวกสารอินทรีย์ระเหยในตัวกลางรูพรุน โดยแบบจำลองคอลัมน์ที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ เบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนในการศึกษา ควบคุมการปล่อยแบบกะที่ทางเข้าผ่านตัวกลางรูพรุนที่เป็นตัวแทนของชั้นน้ำ การวัดความเข้มข้นสารเบนซีนและไตรคลอโรเอธิลีนมีการพัฒนาใช้เครื่องยูวี – วิซิเบิลแทนเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนพบว่าสารคลอไรด์เดินทางเร็วที่สุดตามด้วยสารเบนซีนและสารไตรคลอโรเอธิลีนตามลำดับ การวัดข้อมูลจากการทดลองพบว่าลักษณะทางที่ยาวเป็นผลกระทบของเบ็คดิฟฟิวชันที่อัตราการไหลต่ำ มวลของไตรคลอโรเอธิลีนและเบนซีนจะถูกดูดซับไว้ในอัตราที่สูงซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าตัวประกอบความหน่วงการปรับอัตราการไหลจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงส่งผลให้เกิดสภาวะไม่สมดุลทางเคมี ข้อมูลจากแบบจำลองกายภาพถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM

เรยเส ทิราโด (2550) ศึกษาเรื่องไนเตรทกับคุณภาพน้ำใต้ดินในประเทศไทยในจังหวัดกาญจนบุรีและสุพรรณบุรี ผลการศึกษาพบว่าแหล่งน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมมีมลพิษจากไนเตรทปนเปื้อนสูงมาก และสัมพันธ์กับพฤติกรรมกรรมการทำการเกษตรในรูปแบบอุตสาหกรรมที่เน้นเร่งผลผลิตโดยใส่ปุ๋ยเคมีในปริมาณมาก โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ภาคกลาง ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี และสุพรรณบุรีซึ่งแปลงข้าว เป็นบริเวณที่พบไนเตรทมากที่สุด ซึ่งมีไนเตรทปนเปื้อนสูงกว่า 3 เท่าของมาตรฐานความปลอดภัยในน้ำดื่มองค์การอนามัยโลก (WHO) และมากกว่า 3 เท่าของมาตรฐานน้ำใต้ดินที่ใช้ดื่มของกรมควบคุมมลพิษ ตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลกโดยให้มีไนเตรทปนเปื้อนในน้ำดื่มสูงสุดไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

โคภิชฐ์ ภิรมย์เลิศ (2538) ศึกษาสถานการณ์สาเหตุการแพร่กระจาย และการเพิ่มขึ้นของไนเตรทในน้ำบาดาลบริเวณ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น เนื่องจากพบว่าบริเวณนี้มีไนเตรทเกินมาตรฐานน้ำดื่ม (50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ถึง 25% ของบ่อทั้งหมด ซึ่งมีมากกว่า 1,000 บ่อ

ในพื้นที่ศึกษา ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 6,500 ตารางกิโลเมตร ผลการศึกษาพบบ่อน้ำใต้ดินที่มีความลึกประมาณ 10 เมตร จำนวน 6 บ่อ มีปริมาณไนเตรทสูงกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.4.2.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์

โพยม สราภิรมย์ (2002) ศึกษาการจำลองสภาพน้ำใต้ดินในเขตเมืองเชียงใหม่ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการจัดการและศึกษาสภาพน้ำใต้ดินในเขตเมืองเชียงใหม่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MODFLOW และใช้โปรแกรม Visual MODFLOW version 2.8.1 ในการป้อนข้อมูลเข้าและแสดงผลการจำลอง ผลการจำลองในสภาวะคงที่ พบว่า ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินในบริเวณกว้างมีการไหลจากพื้นที่ขอบแอ่งเข้าสู่ ตอนกลางของแอ่ง แล้วไหลออกจากพื้นที่ศึกษาบริเวณตอนกลางพื้นที่บริเวณอำเภอ สรรภี สมดุลของระบบอุทกธรณีวิทยาที่ได้จากการประเมินโดยใช้แบบจำลอง MODFLOW ผลการทดลองสามารถแจกแจง ได้ดังนี้ การเพิ่มเติมน้ำฝนมีค่าประมาณร้อยละ 1 ในเขตเมือง ส่วนในเขตชนบท มีค่าร้อยละ 3 ถึง 8 ของปริมาณน้ำฝนที่ตกในแต่ละพื้นที่ การเพิ่มเติมน้ำ จากการรั่วซึมของระบบประปาในเขตเมืองมีค่าประมาณ 35 มม./ปี รวมคิดเป็นปริมาณ 116,980 ลบ.ม./วัน ปริมาณการคายระเหยที่ได้จากการประเมินครั้งนี้พบว่า พื้นที่เขตเมืองมีค่าปริมาณการคายระเหยเท่ากับร้อยละ 10 ของปริมาณการระเหย ที่วัดได้จากภาควัดการระเหย ส่วนเขตเกษตรกรรมมีค่าการคายระเหยเท่ากับร้อยละ 50 ของปริมาณการระเหยจากภาควัดการระเหย คิดเป็นปริมาณ 26,181 ลบ.ม./วัน ส่วน ปริมาณการสูบน้ำขึ้นมาใช้นั้น มีค่าประมาณ 21,905 ลบ.ม./วัน

พรนิภา นาคสินไพศาล (2551) ได้ทำการศึกษาการปนเปื้อนสารมลพิษในน้ำใต้ดินจากนาทุ่งและนาข้าวบริเวณ อ.ระโนด จ.สงขลา โดยใช้แบบจำลอง MODFLOW จำลองการไหลของน้ำบาดาลและ MT3D จำลองการเคลื่อนที่ของมลสาร โดยทำการจำลองในชั้นน้ำตะกอนทรายชายหาด ซึ่งเป็นชั้นน้ำไม่มีแรงดัน ชั้นบนสุดของพื้นที่มีโอกาสปนเปื้อนสูงและเป็นชั้นที่มีการซึมผ่านของน้ำได้ดี เนื่องจากเป็นชั้นที่ประกอบด้วยทรายทับถมกัน และทำการจำลองชั้นน้ำหาดใหญ่ ซึ่งเป็นชั้นน้ำที่มีแรงดันที่มีดินเหนียวทับอยู่ด้านบน โดยได้จำลองการแพร่กระจายของคลอไรด์ ไนเตรท ดีดีที กรณีที่ไม่มี การรั่วไหลและมีการรั่วไหลลงสู่ชั้นน้ำหาดใหญ่ที่เวลา 20 ปีและ 30 ปี ในสภาวะการปล่อยมลสารคงที่ ผลการจำลองพบว่าน้ำใต้ดินไหลออกด้านข้างทั้งทิศตะวันออกและตะวันตก ผลการเปรียบเทียบระดับน้ำในแบบจำลองและระดับน้ำจริงกรณีไม่มีการรั่วไหลและมีการรั่วไหลลงสู่ชั้นน้ำหาดใหญ่ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ± 1.94 เมตรและ ± 3.08 เมตร ตามลำดับ ผลการจำลองการแพร่กระจายคลอไรด์จากนาทุ่ง มีการแพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดผ่านชั้นน้ำใต้ดิน ส่วนไนเตรท ดีดีที และเมทธิลพาราไธออนไม่มีการแพร่กระจายทุกกรณี และเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของสารละลายทุกชนิดมากขึ้น ความเข้มข้นที่ปนเปื้อนมีมากขึ้น

เช่นกัน แต่อัตราการสูบที่กำหนดไม่มีผลต่อการแพร่กระจาย และเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ในการจำลองการแพร่กระจาย พบว่า Longitudinal Dispersivity มีผลทำให้คลอไรด์เท่านั้นที่แพร่กระจายออกไปได้ไกลขึ้น

พิศาล ชัยสายัณห์ และบัญชา ขวัญยืน (2004) ได้ศึกษาการจำลองการเคลื่อนตัวของโครงการน้ำใต้ดินสุโขทัย โดยใช้โปรแกรม MODFLOW พบว่าในการสอบเทียบแบบจำลองโดยพิจารณาเปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่บันทึกจากบ่อสังเกตการณ์และค่าระดับน้ำจากการจำลองระดับน้ำที่ได้จากการจำลองมีการแกว่งและแนวโน้มการขึ้นลงของบ่อสอดคล้องกับข้อมูลระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์ ส่วนการคาดการณ์อัตราสูบที่เหมาะสมโดยกำหนดอัตราการสูบต่าง ๆ ตั้งแต่ 35 ถึง 55 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และสูบต่อเนื่องเป็นเวลานาน 10 ปี พบว่าปริมาณการสูบปลอดภัยอยู่ในช่วง 35-40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งเป็นค่าการสูบที่จะไม่ทำให้สมดุลของชั้นน้ำเปลี่ยนแปลง

ลลิตา ธีรวงศ์กุล (2007) ได้ประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนเมื่อเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินด้วยโปรแกรม MODFLOW และ MT3D จากข้อมูลสำรวจทางธรณีวิทยา นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ขอบเขตที่เป็นไปได้ของการปนเปื้อนน้ำใต้ดินในพื้นที่เขตอุตสาหกรรมภาคเหนือจังหวัดลำพูนโดยใช้เทคนิค Monte Carlo Simulation ควบคุมกันกับโปรแกรม MODFLOW และ MT3D ธรณีวิทยาเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ประกอบการจัดทำแผนป้องกันและฟื้นฟูชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ดังกล่าว

อุธร รโหฐาน (2545) ได้ทำการศึกษาสำรวจและวิเคราะห์เพื่อจัดทำแนวทางการจัดการการปนเปื้อนของน้ำชะขยะมูลฝอยที่ลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน บริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสถานการณ์ความรุนแรงของการปนเปื้อนของน้ำชะขยะมูลฝอย ที่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำผิวดิน ผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MODFLOW พบว่าน้ำใต้ดินมีอัตราการไหลเฉลี่ย 2×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที มีทิศทางการไหลจากด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือความเร็วเฉลี่ย 4.2×10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที ผลการคำนวณการแพร่กระจายของนิเกิล โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D พบความเข้มข้นของนิเกิลที่ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ในสภาพปัจจุบันได้แพร่กระจายออกจากพื้นที่ในแนวราบเป็นระยะทางประมาณ 40 กิโลเมตร และลึกจากผิวดินประมาณ 31 เมตร ในอนาคตอีก 50 ปี ในอนาคตอีก 50 ปีจะเคลื่อนที่ห่างออกไปอีกเป็นระยะทางแนวราบ 59 เมตร และเคลื่อนที่ในระดับลึกลงไปอีกเป็นระยะทาง 53 เมตรจากผิวดิน หากมีการฟื้นฟูโดยการลดปริมาณน้ำชะขยะมูลฝอยให้เหลือไม่เกินร้อยละ 20 เคลื่อนที่ห่างออกไปในแนวราบเพียง 50 เมตรและเคลื่อนที่ในระดับลึกลงไป 51 เมตร

อมรรัตน์ วัฒนธรรม (2005) ได้รวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ สํารวจอุทกธรณีวิทยา ติดตามตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ ประเมินการใช้น้บาดาล และจำลองเชิงคณิตศาสตร์ การไหลของน้ำบาดาลใน 3 มิติด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW Version 2.8.1 ทั้งในสภาวะคงที่และสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำการปรับและวิเคราะห์ความอ่อนไหวของ พารามิเตอร์ที่มีต่อแบบจำลอง และนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินสมดุลของน้ำบาดาล

การศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ในต่างประเทศได้มีการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพที่แตกต่างกัน การศึกษาในบางครั้งมีการทดสอบค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ในพื้นที่จริงซึ่งให้ผลการทดสอบที่มีความคลาดเคลื่อนน้อย แต่มีค่าใช้จ่ายสูง ในประเทศไทยการศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ยังมีไม่มากนัก การศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในต่างประเทศพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีการปรับปรุงและใช้มาเป็นเวลายาวนาน จากการศึกษาที่ผ่านมาในประเทศไทยการศึกษาโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D ยังมีไม่มากนัก

1.5 ภาพรวมแนวทางการศึกษา

การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนประเภทไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำแบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1. ศึกษาลักษณะและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวโดยแบบจำลองกายภาพ 2. ศึกษาพฤติกรรมการชะละลายของไนเตรทจากดินหรือชั้นดินไม่อิ่มตัว ลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินภายใต้ช่วงอัตราการเติมน้ำ (Recharge Rate) ที่สอดคล้องกับค่าจริงในพื้นที่ศึกษา โดยแบบจำลองทางกายภาพ 3. จำลองลักษณะ และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของไนเตรทในตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 4. ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับเทียบแล้วในการคาดการณ์ การแพร่กระจายของไนเตรท ในชั้นน้ำใต้ดินที่ระดับ Field Scale โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1.5.1 ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลองกายภาพ

1.5.1.1 รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องจากหน่วยงานต่าง ๆ เพื่อนำมาทำงานวิจัย

1.5.1.2 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติสารปนเปื้อนไนเตรทที่ใช้ทดลองในแบบจำลองกายภาพ

1.5.1.3 ศึกษาข้อมูลดิน กำหนดวิธีการจำแนกดินและชนิดของดินที่ใช้ศึกษาในแบบจำลองกายภาพ

1.5.1.4 ออกแบบแนวทาง และกำหนดขอบเขตของการทดลอง

1.5.1.5 ศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในเตรทผ่านตัวกลางพรุนภายใต้สภาวะชั้นน้ำอิ่มตัว โดยทดลองและวัดความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในตัวกลางพรุน

1.5.1.6 คำนวณและวิเคราะห์ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อน ค่าการแพร่และค่าตัวประกอบความหน่วงซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในเตรทในตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

1.5.1.7 สรุปผลการทดลองจากแบบจำลองกายภาพ

1.5.2 ศึกษาพฤติกรรมและการชะละลายของไนเตรทจากดินหรือชั้นดินไม่อิ่มตัว ลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินภายใต้ช่วงอัตราการเติมน้ำ (Recharge Rate) ที่สอดคล้องกับค่าจริงในพื้นที่ศึกษา คืออัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยแบบจำลองทางกายภาพ

1.5.2.1 รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องจากหน่วยงานต่าง ๆ เพื่อมาทำงานวิจัย

1.5.2.2 ศึกษาข้อมูลดิน กำหนดวิธีการจำแนกดินและชนิดของดินที่ใช้ศึกษา

1.5.2.3 ออกแบบแนวทาง และกำหนดขอบเขตของการทดลอง

1.5.2.4 ศึกษาพฤติกรรมและการชะละลายของไนเตรทจากดิน โดยทดลองวัดความเข้มข้นของไนเตรทที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในตัวกลางรูพรุน

1.5.2.5 หาปริมาณไนเตรทที่ตกค้างอยู่ในดินทดลองและเปรียบเทียบความเข้มข้นของไนเตรทในดินเริ่มต้นก่อนทำการชะละลาย

1.5.2.6 สรุปผลการทดลอง

1.5.3 ศึกษาและจำลองพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของไนเตรทในตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำในแบบจำลองคณิตศาสตร์

1.5.3.1 ศึกษาทฤษฎีจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ MODFLOW และ MT3D

1.5.3.2 สร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ให้สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองและนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองกายภาพมาเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองคณิตศาสตร์

1.5.3.3 จำลองลักษณะการเคลื่อนตัวของไนเตรท และเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์และคำนวณค่าตัวประกอบความหน่วงและค่าการแพร่

1.5.3.4 วิเคราะห์ผลการจำลองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์เทียบกับแบบจำลองทางกายภาพ

1.5.3.5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1.5.4 ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับเทียบแล้ว และคาดการณ์การแพร่กระจายของไนเตรทในชั้นน้ำใต้ดิน ในพื้นที่ศึกษาที่ระดับ Field Scale



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา



บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎี

การศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของไนเตรทในระบบชั้นน้ำใต้ดินแบบอิ่มตัว (Saturated Groundwater Flowing System) โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MODFLOW และ MT3D จำเป็นต้องศึกษาองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน แหล่งกำเนิดของการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน การปนเปื้อนของไนเตรทในแหล่งน้ำใต้ดินของประเทศไทย สมการการไหลของน้ำใต้ดิน สมการการเคลื่อนตัวของสารละลาย ค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์และอุทกธรณีวิทยาต่าง ๆ ของน้ำใต้ดิน รวมทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ของไนเตรท ดังนี้

2.1 แหล่งน้ำใต้ดิน

แหล่งน้ำใต้ดิน คือบริเวณที่มีน้ำบาดาลสะสมตัวอยู่เป็นปริมาณมาก โดยแหล่งน้ำบาดาลที่ดีควรจะเป็นชั้นหินที่มีความโปร่งตัวสูง และมีความซึมผ่านสูง ได้แก่ ชั้นกรวดทรายที่มีการทับถมกันใหม่ ๆ ยังไม่กลายเป็นหิน หินทรายที่มีความโปร่งตัวและความซึมผ่านสูง หินปูนที่มีรอยร้าว และมีโพรงในหิน เรียกว่า “ชั้นหินให้น้ำ” (Aquifer) สำหรับการนำน้ำบาดาลมาใช้มี 3 ลักษณะ คือ

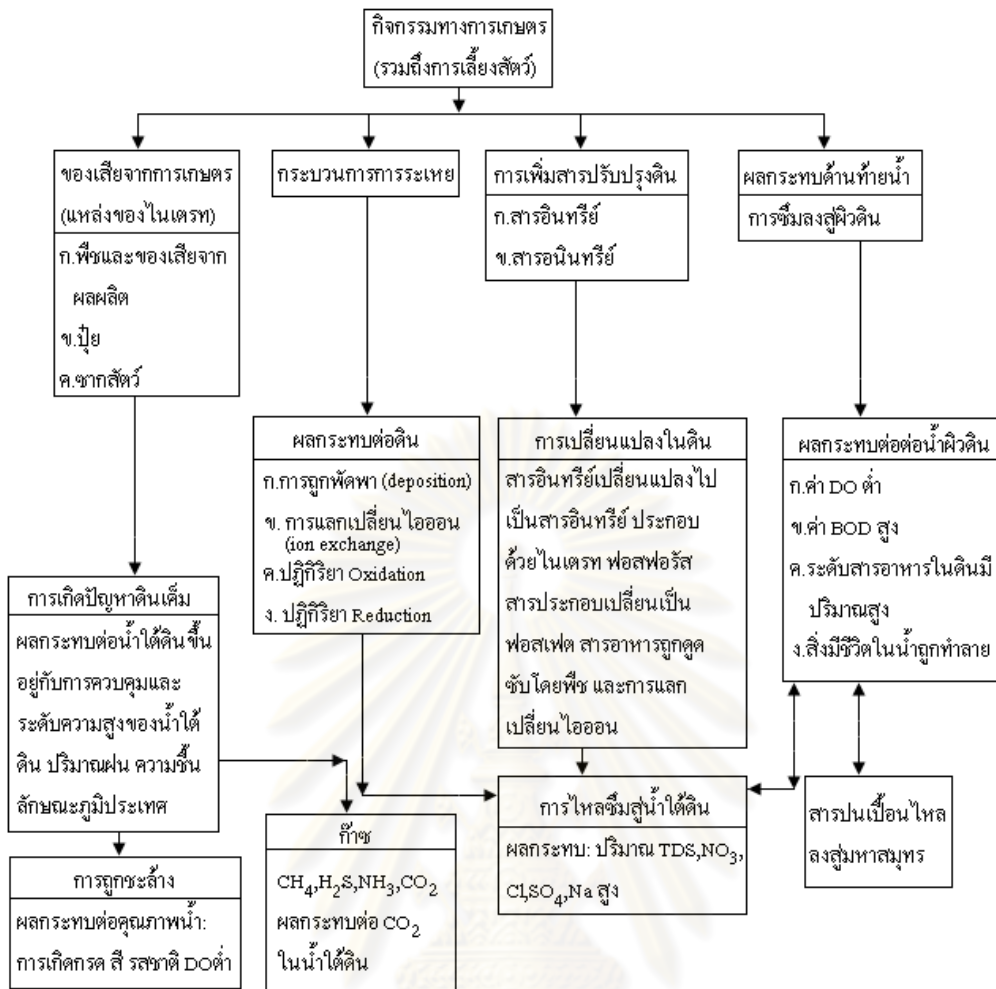
1. บ่อน้ำบาดาล (Deep Wells) เป็นบ่อที่มีระดับความลึกมาก ๆ ในทางวิศวกรรมไม่สามารถกำหนดระดับความลึกได้แน่ชัด การนำน้ำขึ้นมาใช้ต้องใช้เครื่องมือช่วยขุด บางแห่งเมื่อขุดลงไปอาจมีปริมาณน้ำมากในช่วงแรกเท่านั้น เรียกว่า บ่อน้ำบาดาลปลอม บ่อน้ำบาดาลควรมีปริมาณการให้น้ำตลอดเวลาเนื่องมาจากน้ำใต้ดินบริเวณรอบ ๆ บ่อจะไหลเข้ามาแทนที่ตลอดเวลา
2. บ่อน้ำตื้น (Shallow Wells) เป็นบ่อที่ขุดขึ้นโดยไม่ลึกมากนัก โดยระดับความลึกแค่ผิวดินชั้นบนเท่านั้น สามารถขุดเจาะได้เอง บ่อน้ำตื้นจะมีปริมาณน้ำเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลและสภาพภูมิประเทศบริเวณนั้น
3. ทางน้ำซับ (Infiltration Galleries) มีลักษณะเป็นน้ำใต้ดินที่ไหลซึมผ่านชั้นดินตามแนวตั้งไปสะสมตัวในชั้นหินในแนวนอนหรือแนวราบจนมีปริมาณมากและไม่สามารถไหลซึมผ่านไปได้อีกก็จะไหลไปตามแนวเทของชั้นหินหรือลักษณะภูมิประเทศ จนถึงจุดที่มีทางออก เช่น ตามลาดเขา หรือจุดตัดระหว่างชั้นหินกับบริเวณผิวดิน น้ำใต้ดินจึงไหลออกมาได้ จึงมักพบบริเวณลาดเขา หรือเชิงเขา บางครั้งพบว่าบางพื้นที่จะได้เห็นน้ำซับซึมจากชั้นดิน ถ้ามีปริมาณน้ำมากสามารถนำมาใช้ได้ ในกรณีที่น้ำไหลมีกำลังแรงมาก เรียกว่า “น้ำพุ” มีประโยชน์ในการนำกลับมาใช้เป็นแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคและบริโภค

2.2 มลภาวะน้ำใต้ดิน (Groundwater Pollution)

มลภาวะน้ำใต้ดินหมายถึงการลดลงของคุณภาพน้ำใต้ดินอันเนื่องมาจากการกระทำของมนุษย์หรือโดยธรรมชาติ ส่งผลให้ใช้ประโยชน์จากน้ำใต้ดินได้อย่างจำกัด หรือเป็นอันตรายต่อสุขภาพ เนื่องจากสารพิษหรือเชื้อโรค (Todd 1980) มลภาวะทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนไปทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ (Fried 1974) โดยทฤษฎีนับตั้งแต่เริ่มพัฒนาแอ่งน้ำใต้ดิน การเจาะและพัฒนาบ่อน้ำใต้ดินก็เป็นจุดเริ่มต้นทำให้มีสิ่งเจือปนเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ (ฉลอง บัวผัน 2534) เมื่อเริ่มสูบน้ำขึ้นมาใช้คุณภาพน้ำบางอย่างก็เริ่มเปลี่ยนไป โดยอาจมีความสัมพันธ์กับอัตราการสูบน้ำ นอกจากนี้สิ่งเจือปนจากภาคเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม และแหล่งชุมชน ก็มีโอกาสเจือปนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ นับตั้งแต่ชั้นน้ำเปิด ซึ่งอยู่ใกล้ผิวดินไปจนถึงชั้นน้ำปิดภายใต้แรงดัน (Confined Aquifer) ที่อยู่ลึกลงไปโดยการรั่วซึม ผ่านชั้นดิน ชั้นน้ำ และผ่านบ่อน้ำใต้ดิน

2.3 ลักษณะการใช้น้ำและการปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดิน

การใช้น้ำเพื่อการเกษตรแบ่งออกเป็น 2 เขตใหญ่ ๆ คือ เขตเกษตรน้ำฝนและเขตเกษตรชลประทาน ในอดีตการทำเกษตรกรรมจะอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก ซึ่งสภาวะธรรมชาติก็อยู่ในสภาพสมดุล เมื่อมีการสร้างเขื่อนต่าง ๆ ขึ้นบริเวณต้นน้ำ ก็เป็นการเริ่มยุคเกษตรชลประทานสมัยใหม่ขึ้น การเกษตรสมัยใหม่ในเขตเกษตรน้ำฝน เริ่มมีการใช้พันธุ์ข้าว และพืชสมัยใหม่ทำให้ต้องมีการใส่ปุ๋ย และฉีดยาฆ่าแมลงเพิ่มเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีการทำไร่ เช่น ไร่อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด หน่อไม้ และปอ ส่งผลทำให้มีการทำลายป่าไม้จำนวนมาก และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพต้นน้ำลำธาร และการเกิดดินเค็ม ส่วนเขตเกษตรชลประทานนับว่ามีผลต่อการเกิดมลภาวะในน้ำบาดาล มีการใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงเป็นอย่างมากเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี โดยเฉพาะในเขตภาคกลางของประเทศไทย มีการทำนาปีละ 2 ครั้ง ไร่ที่ 2-1 แสดงการใช้น้ำเพื่อการเกษตรแต่ละชนิด จะมีผลต่อคุณภาพน้ำ สารเคมีต่าง ๆ ที่เหลือจากปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และวัตถุปรับปรุงดิน รวมทั้งเศษมูลสัตว์ ซากพืช ซากสัตว์ จะเริ่มที่ผิวดินแล้วเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินบริเวณรากพืช แล้วลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน



รูปที่ 2-1 การใช้น้ำเพื่อการเกษตรและผลต่อคุณภาพน้ำ (ปรับปรุงจาก Everett 1980)

2.4 แหล่งกำเนิดมลภาวะน้ำใต้ดิน

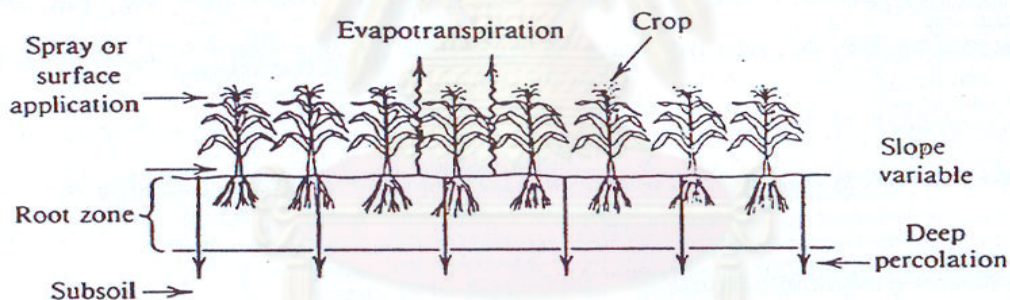
แหล่งกำเนิดของมลภาวะน้ำใต้ดินนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 4 แหล่งใหญ่ คือ ภาคเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม ภาคพาณิชย์ และภาคชุมชน Fried (1975) ได้กล่าวว่า ตามทฤษฎีคนสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ด้วยน้ำ 5 ลิตร ต่อ 1 วัน สำหรับใช้อุปโภคและบริโภค โดยเฉลี่ยใช้ 40 – 50 ลิตรต่อวันต่อคน ในการทำการเกษตรต้องใช้น้ำมากขึ้น โดยที่ชาวบ้านต้องการน้ำอย่างน้อยคนละ 100 ลิตรต่อวัน ในขณะที่ภาคอุตสาหกรรมปกติมีความต้องการน้ำ 400 – 500 ลิตรต่อวันต่อคน เพื่อสนองความต้องการน้ำดังกล่าวเป็นผลให้มีการพัฒนาแหล่งน้ำอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้น้ำผิวดินยังมีการปนเปื้อนได้ง่ายและมากขึ้นทุกวัน น้ำใต้ดินจึงถูกนำมาใช้ทดแทนแหล่งน้ำผิวดินมากยิ่งขึ้น

2.4.1 แหล่งและสาเหตุของมลภาวะ

เขตเกษตรกรรมทั้งเขตเกษตรน้ำฝนและเขตเกษตรชลประทาน เป็นแหล่งกำเนิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินรูปแบบหนึ่งโดยที่เขตเกษตรชลประทานมีแนวโน้มปล่อยของเสียลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินและก่อให้เกิดการปนเปื้อนได้มากกว่า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.4.1.1 น้ำเหลือจากการชลประทาน น้ำทั้งหมดที่ใช้ในการเพาะปลูกประมาณ 1/2-2/3 จะถูกพืชนำไปใช้ ส่วนที่เหลือบางส่วนจะไหลลงสู่แม่น้ำและอีกส่วนจะไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ส่งผลให้น้ำใต้ดินมีคุณภาพลดลงจากปริมาณ Salinity ที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของเกลือเนื่องจากการละลายระหว่างอยู่ในแปลงพืช นอกจากนี้ยังได้รับเกลือและแร่ธาตุต่าง ๆ จากปุ๋ยหรือสารปรับปรุงดิน นอกจากนี้กระบวนการระเหยของน้ำยังช่วยเพิ่มความเข้มข้นของเกลือในแหล่งน้ำด้วยส่งผลให้ค่า salinity ของน้ำจากการปลูกพืชมีค่าความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น 3 ถึง 10 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเริ่มต้น

น้ำเหลือจากการชลประทานจัดเป็นแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนแบบ Non -Point Source เนื่องจากธรรมชาติของการปนเปื้อนที่มีอาณาเขตกว้างขวาง พบได้มากในเขตภาคกลางตอนบน และเขตเกษตรชลประทานทุก ๆ เขตทั่วประเทศไทย



รูปที่ 2-2 แหล่งมลพิษจากการชลประทาน (Todd 1980)

2.4.1.2 ของเสียจากสัตว์ เช่น ฟาร์มวัวนม หรือวัวเนื้อ สำหรับ 120 – 150 วันที่วัวอยู่ในคอกจะให้ของเสียแห้งได้ถึงครึ่งตัน นอกจากนี้ของเสียจากสัตว์ยังรวมไปถึงคอกสุกร ฟาร์มไก่ ฟาร์มกุ้ง และบ่อเลี้ยงปลา ซึ่งผลผลิตของเสียปริมาณมากพอสมควร เมื่อเกิดฝนตกก็จะชะเอาของเสียจากการเลี้ยงสัตว์ลงสู่บ่อน้ำ ลำธาร และบางส่วนซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ของเสียจากสัตว์เป็นตัวเพิ่มเกลือ สารอินทรีย์ และจุลินทรีย์ลงสู่ดิน จากการวิเคราะห์พบของเสียในรูปของ Nitrate - N เป็นหลักซึ่งไหลลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินโดยตรง

2.4.1.3 ของเสียจากปุ๋ย และสารปรับปรุงดิน ในปัจจุบันมีการใช้ปุ๋ยและสารปรับปรุงดินในมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเร่งผลผลิตให้เพียงพอกับความต้องการ

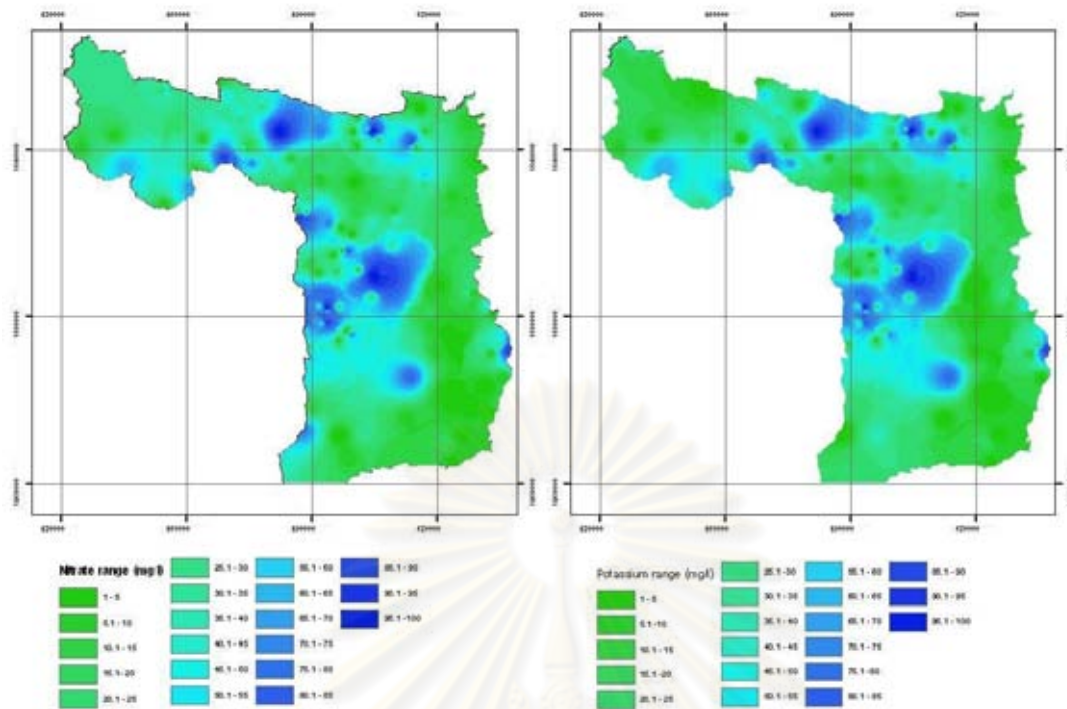
และเพิ่มผลตอบแทนในการดำเนินการ ปุ๋ยที่ใช้บางส่วนจะตกค้างในดินเมื่อมีฝนตกหรือน้ำเหลือจากการชลประทานก็จะชะล้างลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินในที่สุด มลพิษจากปุ๋ยและสารปรับปรุงดินมีส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ ส่วนประกอบ NO_3^- และฟอสฟอรัส ปุ๋ยฟอสเฟต ส่วนใหญ่เมื่อใส่ลงดินจะถูกดูดซับด้วยอนุภาคดินซึ่งมีแนวโน้มจะก่อให้เกิดมลภาวะต่อน้ำใต้ดินน้อยมาก ในขณะที่ไนโตรเจนในสารละลายบางส่วนเท่านั้นที่พืชสามารถนำไปใช้และมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกดูดซับไว้โดยอนุภาคดินหรือสูญเสียไปในรูปก๊าซสู่ชั้นบรรยากาศ ดังนั้นจึงพบว่าไนโตรเจนเป็นธาตุหลักที่ทำให้เกิดมลภาวะในน้ำใต้ดิน

2.4.2 การปนเปื้อนไนเตรทในแหล่งใต้ดินของประเทศไทย

แหล่งกำเนิดไนเตรทมาจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ซึ่งสามารถก่อให้เกิดมลภาวะต่อน้ำใต้ดินในระดับที่อันตราย สิ่งปฏิญจากมนุษย์และการปศุสัตว์ ของเสียจากกระบวนการผลิตอาหาร ของเสียจากบ่อเกรอะ (Septic Tank) ในบริเวณชุมชนเมือง รวมถึงการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เป็นแหล่งกำเนิดไนเตรทที่สามารถทำให้เกิดการปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน ในพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการใช้ปุ๋ยที่มีองค์ประกอบของไนเตรทมากกว่าความต้องการของพืช ทำให้พืชไม่สามารถนำไนโตรเจนจากไนเตรทไปใช้ได้หมด ส่วนที่เหลือจึงเจือปนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

แหล่งกำเนิดไนเตรทส่วนใหญ่ในประเทศไทยมาจากพื้นที่เกษตรกรรม เกษตรกรส่วนใหญ่มักจะปลูกพืชจนดินสูญเสียธาตุอาหารไปจนหมด จากนั้นจะทำการใส่ปุ๋ยที่มีไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบลงในดินโดยหวังว่าพืชที่ปลูกจะให้ผลผลิตคงเดิมหรือมากกว่าเดิม จากการศึกษาของ Burkart และ Kolpin (1993) พิสูจน์ได้ว่าการเกษตรกรรมเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนไนเตรทในน้ำใต้ดินในสหรัฐอเมริกา โดยพบว่าตัวอย่างน้ำที่เก็บจากบ่อบาดาลบริเวณพื้นที่ปลูกข้าวโพดและถั่วเหลืองมีปริมาณไนเตรทสูงกว่าตัวอย่างน้ำจากบ่อบาดาลที่อยู่นอกพื้นที่เกษตรกรรมโดยรอบ และการเพิ่มขึ้นของไนเตรทในชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ชลประทานมีมากกว่าในพื้นที่นอกเขตชลประทาน (Burkart and Kolpin 1993) เนื่องจากปริมาณน้ำชลประทานที่มากพอที่จะชะล้างไนเตรทและสารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ลงไปในน้ำใต้ดิน

การศึกษาโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาลในปี 2550 ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่มีการปนเปื้อน ซึ่งแหล่งปนเปื้อนมาจากปุ๋ยที่เกษตรกรใส่ลงไปในดิน เมื่อเกิดการชะล้างลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินทำให้เกิดการปนเปื้อน ซึ่งจากการสำรวจครั้งนี้ตรวจพบสารปนเปื้อนที่มาจากปุ๋ย ได้แก่ ไนเตรท และโพแทสเซียมดังแสดงในรูปที่ 2-3 ทำให้ทราบว่าการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินบริเวณจังหวัดสุพรรณบุรีมาสาเหตุมาจากการใส่ปุ๋ยในปริมาณมากลงไปในดิน



รูปที่ 2-3 แสดงปริมาณไนเตรทและโพแทสเซียมในแหล่งน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อน

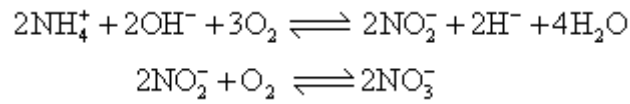
การศึกษาจากกรมทรัพยากรธรณี (2545) รายงานข้อมูลโครงการศึกษาศักยภาพและความต้องการใช้น้ำใต้ดินเพื่อการจัดการน้ำใต้ดินพื้นที่ด้านเหนือของที่ราบภาคกลางตอนล่าง กลุ่มที่ 2 บ่อบาดาลเอกชน จังหวัดสุพรรณบุรี โดยการเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดินมาตรวจสอบวัดหาค่าไนเตรทที่ปนเปื้อน จากการสำรวจบ่อบาดาลทั้งหมด 40 บ่อ ในอำเภอเมือง อำเภออู่ทอง อำเภอบางปลาม้า อำเภอศรีประจันต์ อำเภอดอนเจดีย์ อำเภอสองพี่น้อง อำเภอด่านช้าง และอำเภอเดิมบางนางบวช ผลการตรวจสอบพบว่า อำเภออู่ทอง มีจำนวนบ่อบาดาลที่ตรวจสอบทั้งหมด 11 บ่อ มีจำนวนบ่อที่มีไนเตรทเกินค่ามาตรฐานจำนวน 3 บ่อ ในตำบลอู่ทอง คือบ่อที่ 1 ความลึกบ่อ 100 เมตร มีปริมาณไนเตรท 380 มิลลิกรัมต่อลิตร บ่อที่ 2 ความลึกบ่อ 100 เมตร มีปริมาณไนเตรท 380 มิลลิกรัมต่อลิตร และบ่อที่ 3 ความลึกบ่อ 120 เมตร มีปริมาณไนเตรท 120 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.2.1 ลักษณะการปนเปื้อนของไนเตรทในสิ่งแวดล้อม (Environmental Fate)

สารไนโตรเจนมีการแลกเปลี่ยนระหว่างบรรยากาศและพื้นดินอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า วัฏจักรของไนโตรเจน (Nitrogen Cycle)

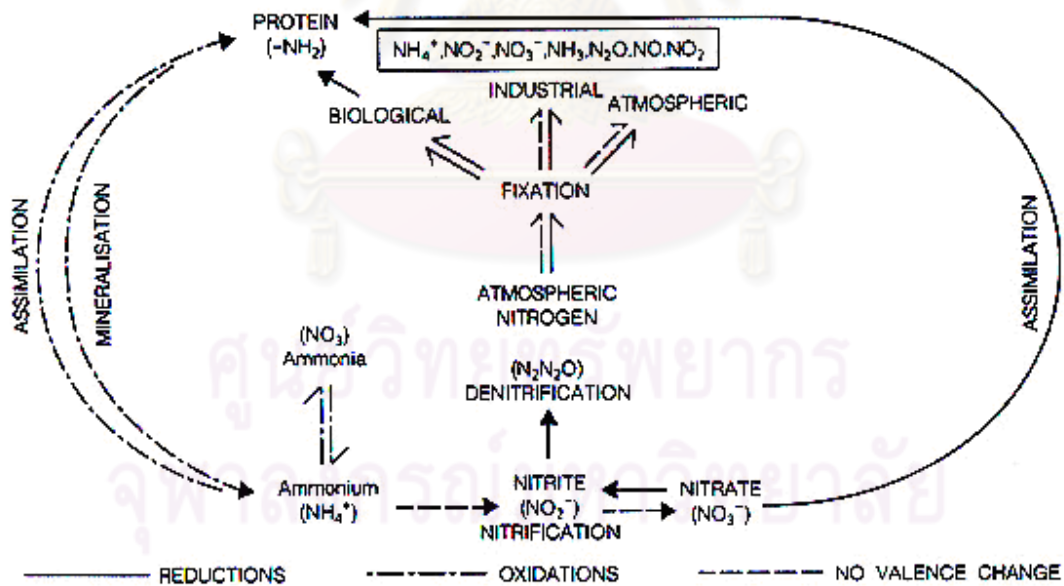
ไนโตรเจนในบรรยากาศถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบ เช่น แอมโมเนียไนเตรท และไนไตรท์ โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในพืชและดิน โดยกระบวนการในบรรยากาศและกระบวนการทาง

อุตสาหกรรมในสภาพแวดล้อม เช่น น้ำผิวดิน และดิน แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) สามารถเปลี่ยนเป็นไนเตรทและไนไตรท์ไอออนได้ โดยกระบวนการ Biological Oxidation (nitrification) 2 ขั้นตอนดังนี้



ปฏิกิริยาทั้งสองนี้อาศัยจุลินทรีย์ที่ต่างกัน กล่าวคือโดยจุลินทรีย์ชนิด Aerobic Chemolithotroph หรือ Nitrosomonas และจุลินทรีย์ Nitrobacter ซึ่งได้รับพลังงานเกือบทั้งหมดจากการออกซิเดชันของไนไตรท์

พืชสามารถใช้ไนเตรทได้บางส่วน ดังนั้นบางส่วนจะไหลลงสู่ผิวดินและแม่น้ำ ในขณะที่บางส่วนเกิดกระบวนการ Denitrification ซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่สลายไนเตรทเป็นไนโตรเจน และไนตรัสออกไซด์แล้วเข้าสู่บรรยากาศ ดินและน้ำ ไนเตรทบางส่วนถูกดูดซึมโดยพืช จะถูกใช้ในการสังเคราะห์ชีวโมเลกุล (Biological Molecules) โดยเฉพาะโปรตีน ในที่สุดของเสียจากพืช และสัตว์เปลี่ยนเป็นไนโตรเจนไปยังดิน ซึ่งบางส่วนจะมีการหมุนเวียนกลับไปสู่บรรยากาศตามวัฏจักรของไนโตรเจน



รูปที่ 2-4 วัฏจักรของไนโตรเจน (Workshop on Global Ecology 1971)

2.4.2.2 ความเข้มข้นในสิ่งแวดล้อม (Environmental Concentration)

2.4.2.2.1 **บรรยากาศ** ชั้นตอนสุดท้ายของออกซิเดชันในบรรยากาศของออกไซด์ของไนโตรเจนคือ Nitrate Aerosols และปริมาณของฝุ่นในอากาศที่เกิดจาก Photochemical Pollution อาจเกิดขึ้นในเมือง ความเข้มข้นของไนเตรทในอากาศอยู่ระหว่าง 1-40 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขึ้นกับการเก็บตัวอย่างและระยะเวลา

2.4.2.2.2 **น้ำ** ความเข้มข้นของไนเตรทและไนโตรทในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินแตกต่างกันอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพทางธรณีวิทยา การจัดการเกี่ยวกับของเสียจากมนุษย์ และสัตว์ การใช้ปุ๋ย และการปล่อยของเสียออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

2.5 สมการการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow Equation)

ในปี ค.ศ.1856 Henry Darcy ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของน้ำผ่านวัสดุที่มีรูพรุน (Porous Media) โดยทำการทดลองในชั้นทราย และได้รายงานผลการศึกษาว่าอัตราการไหลของน้ำผ่านวัสดุที่มีรูพรุน จะแปรผันตรงกับความลาดชันของไฮดรอลิก (Hydraulic Gradient) ปริมาณการไหลของน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ (Hydraulic Conductivity, K) ของวัสดุนั้น

$$V = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2-1)$$

เมื่อ	V	คือ ความเร็วของการไหลของน้ำใต้ดิน (LT^{-1})
	K	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) (LT^{-1})
	Δh	คือ ความแตกต่างของระดับน้ำ หรือ Piezometric Head (L)
	Δl	คือ ระยะทางวัดตามทิศทางความเร็วเฉลี่ยการไหล (L)

จากสมการของดาร์ซี พบว่า การไหลของน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ ผ่านตัวกลางรูพรุนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous Porous Media) ภายใต้สภาวะการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) และเป็นการไหลที่ขึ้นกับทิศทาง (Anisotropy) สามารถอธิบายด้วยสมการพาเซียดิฟเฟเรนเชียลดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-2)$$

เมื่อ K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} คือ ค่าของ Hydraulic Conductivity ตามแนวแกน X, Y และ Z ซึ่งถูกสมมุติให้ขนานกับแกนหลักของ Hydraulic Conductivity (LT^{-1})

h คือ ค่าความสูงระดับน้ำใต้ดิน (Potentiometric Head) (LT^{-1})

W	คือ ค่า Volumetric Flux ต่อหน่วยปริมาตรทั้งจุดให้น้ำและสูบน้ำ (T^{-1})
S_s	คือ ค่า Specific Storage ของวัสดุรูพรุน (L^{-1})
t	คือ ค่าเวลา (T)

2.6 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

2.6.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity, K)

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางรูพรุนหรือชั้นให้น้ำซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกลางรูพรุน เช่น ขนาดของเม็ดดินและจำนวนช่องว่างระหว่างเม็ดดินของตัวกลางรูพรุนนั้นๆ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนาแน่นและความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลด้วยเช่นกัน แสดงในสมการต่อไปนี้

$$K = \frac{T}{b} \quad (2-3)$$

เมื่อ	T	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Transmissibility: T, L^2T^{-1})
	b	คือ ความหนาของชั้นน้ำแบบปิด (L)

หรือหาได้จากสมการคาร์เมน-โคเซินีย์ (Carmen-Kozeny) แสดงในสมการต่อไปนี้

$$K = \frac{\rho_w g}{\mu_w} \left[\frac{d_m^2 \phi^3}{180 (1-\phi)^2} \right] \quad (2-4)$$

เมื่อ	ρ_w	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (Density: MV^{-1})
	g	คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force: LT^{-2})
	μ_w	คือ ความหนืดของน้ำ (Viscosity: cp)
	d_m	คือ ขนาดเฉลี่ยของตัวกลางรูพรุน (L)
	ϕ	คือ ความพรุนของตัวกลางรูพรุน

จากการศึกษาวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่าดินแต่ละประเภทจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ในดินแต่ละชนิด (Domenico and Schwartz 1990)

Material	Hydraulic Conductivity (m/s)
<u>SEDIMENTARY</u>	
Gravel	$4 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$
Coarse sand	$9 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-3}$
Medium sand	$9 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-4}$
Fine sand	$2 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-4}$
Silt, loess	$1 \times 10^{-9} - 2 \times 10^{-5}$
Till	$1 \times 10^{-12} - 2 \times 10^{-6}$
Clay	$1 \times 10^{-11} - 4.7 \times 10^{-9}$
Unweathered marine clay	$8 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-9}$
<u>SEDIMENTARY ROCKS</u>	
Karst and reef limestone	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-2}$
Limestone, dolomite	$1 \times 10^{-9} - 6 \times 10^{-6}$
Sandstone	$3 \times 10^{-10} - 6 \times 10^{-6}$
Siltstone	$1 \times 10^{-11} - 1.4 \times 10^{-8}$
Salt	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-10}$
Anhydrite	$4 \times 10^{-13} - 2 \times 10^{-8}$
Shale	$1 \times 10^{-13} - 2 \times 10^{-9}$
<u>CRYSTALLINE ROCKS</u>	
Permeable basalt	$4 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-2}$
Fractured igneous and metamorphic rock	$8 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-4}$
Weathered granite	$3.3 \times 10^{-6} - 5.2 \times 10^{-5}$
Weathered gabbro	$5.5 \times 10^{-7} - 3.8 \times 10^{-6}$
Basalt	$2 \times 10^{-11} - 4.2 \times 10^{-7}$
Unfractured igneous and metamorphic rocks	$3 \times 10^{-14} - 2 \times 10^{-10}$

2.6.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Transmissivity, T)

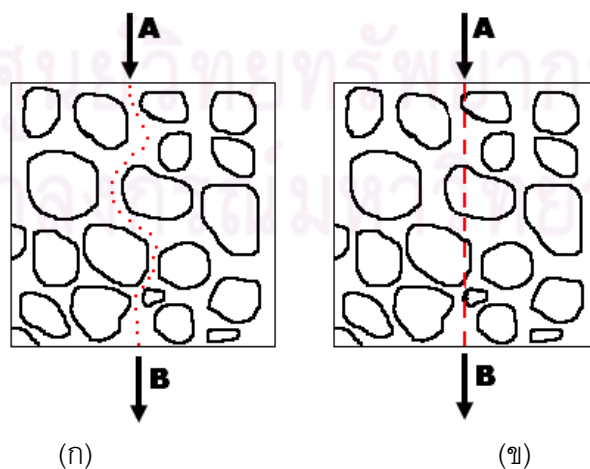
คือความสามารถของชั้นให้น้ำของชั้นน้ำแบบปิด (Confined aquifers) ในการยอมให้น้ำไหลผ่านตัวเองได้ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T = Kb \quad ; [L^2T^{-1}] \quad (2-5)$$

เมื่อ K คือค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้
B คือความหนาของชั้นให้น้ำแบบปิด

2.6.3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (Permeability, k)

ในการศึกษาผลที่เกิดเนื่องจากการไหลของน้ำภายในมวลดินธรรมชาติที่มีผลต่อคุณสมบัติของมวลดิน ต้องเรียนรู้ถึงวิธีการและลักษณะการไหลของน้ำภายในมวลดินก่อน ช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือ voids ในมวลดินใด ๆ นั้น สามารถทะลุติดต่อกันได้ แม้แต่ในดินประเภท Fine-Grained Soils ซึ่งช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดเล็กมาก การไหลของน้ำภายในมวลดินธรรมชาติจะไหลเป็นทางคดเคี้ยวไปตาม Void Channel จาก void หนึ่งไปสู่อีก void หนึ่ง และธรรมชาติการไหลของน้ำ จะพยายามใช้ทางที่สั้นที่สุดในการไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดในมวลดินนั้น (ดังรูปที่ 2-4 ก) ด้วยความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ แล้วแต่ขนาดช่องว่างเม็ดดินที่น้ำนั้นไหลผ่าน อย่างไรก็ตามในทางทฤษฎี สมมุติว่าน้ำไหลผ่านมวลดินใด ๆ ในแนวเส้นตรงด้วยความเร็วคงที่ระหว่างสองจุดใด ๆ ที่กำหนดให้ เมื่อมวลดินที่น้ำไหลผ่านเป็นมวลดินที่มีเนื้อเดียวกันตลอด (Homogeneous Soils) ความเร็วคงที่ของการไหลของน้ำภายในมวลดินเนื้อเดียวกันเรียกว่า Effective Velocity หรือ Seepage Velocity



รูปที่ 2-5 การไหลของน้ำในมวลดินระหว่างจุด 2 จุด (เดชาวุธ จารุตามระ 2527)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้เป็นคุณสมบัติเฉพาะของหินหรือดินที่แสดงถึงความสามารถส่งผ่านของเหลวผ่านวัตถุพุนั้น ๆ สามารถอธิบายสมการดังนี้

$$k = \frac{\mu K}{\rho g} \quad (2-6)$$

เมื่อ	k	คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (Permeability: L ²)
	μ	คือ ความหนืดของเหลว (Viscosity: cp)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของเหลว (Density: MV ⁻¹)
	g	คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force: LT ⁻²)
	K	คือ สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic conductivity: LT ⁻¹)

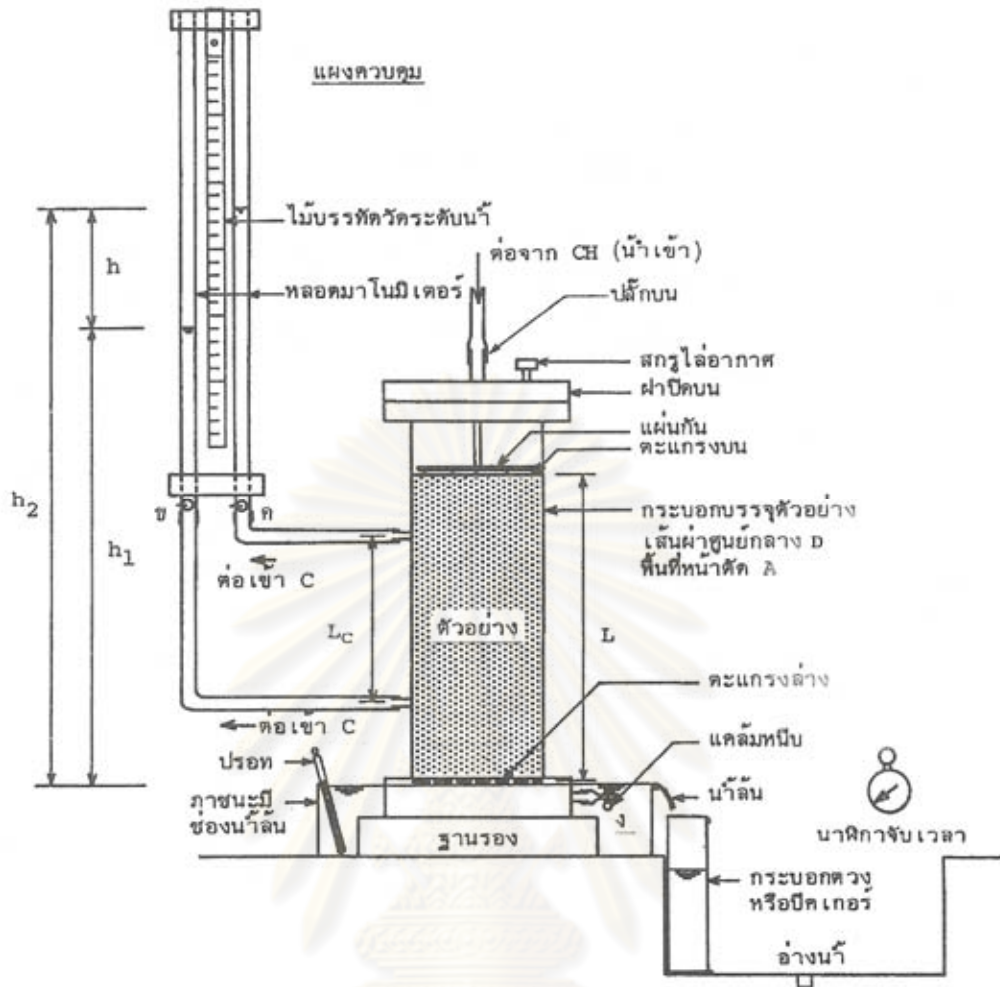
การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของชั้นหินอุ้มน้ำสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การประมาณของสมการการไหล การทดลองในห้องปฏิบัติการ การใช้สารเทรเซอร์ (Tracer) การทดสอบในภาคสนามโดยสลักเทสต์ (Slug Test) และการสูบทดสอบจากบ่อเจาะ สำหรับในการศึกษานี้จะประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้โดยดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.6.3.1 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของมวลดินในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Permeability Test)

การดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการใช้เครื่องมือทดสอบเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1. การทดลองภายใต้สภาวะระดับน้ำคงที่ (Constant Head) และ 2. การทดลองภายใต้สภาวะระดับน้ำเปลี่ยนแปลง (Falling Head) ซึ่งมีหลักการในการทดสอบดังนี้

1. การทดลองภายใต้สภาวะระดับน้ำคงที่ เป็นวิธีที่ใช้ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ตัวกลางรูปพุนประเภทดิน กรวด ททรายหยาบ ที่อาจมีดินตะกอนปนเล็กน้อยหรือไม่มีปนเลย มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านปานกลางถึงสูง

วิธีการทดสอบ เริ่มต้นจากการออกแบบการทดลองให้น้ำสามารถไหลผ่านตัวอย่างดินที่บรรจุอย่างดีในกระบอกบรรจุตัวอย่างโดยควบคุมระดับน้ำเข้าและออกจากตัวอย่างดิน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้คำนวณจากปริมาณน้ำที่ไหลและค่าความต่างระดับน้ำในหลอดมาโนมิเตอร์ที่ลดลงในระยะตัวอย่างที่กำหนด อธิบายได้ดังรูปที่ 2-6 และสมการดังนี้



รูปที่ 2-6 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ภายใต้สภาวะคงที่ (สถาพร 1998)

$$K_t = \frac{Q \times L_c \times 60}{t \times h \times A} \quad (2-7)$$

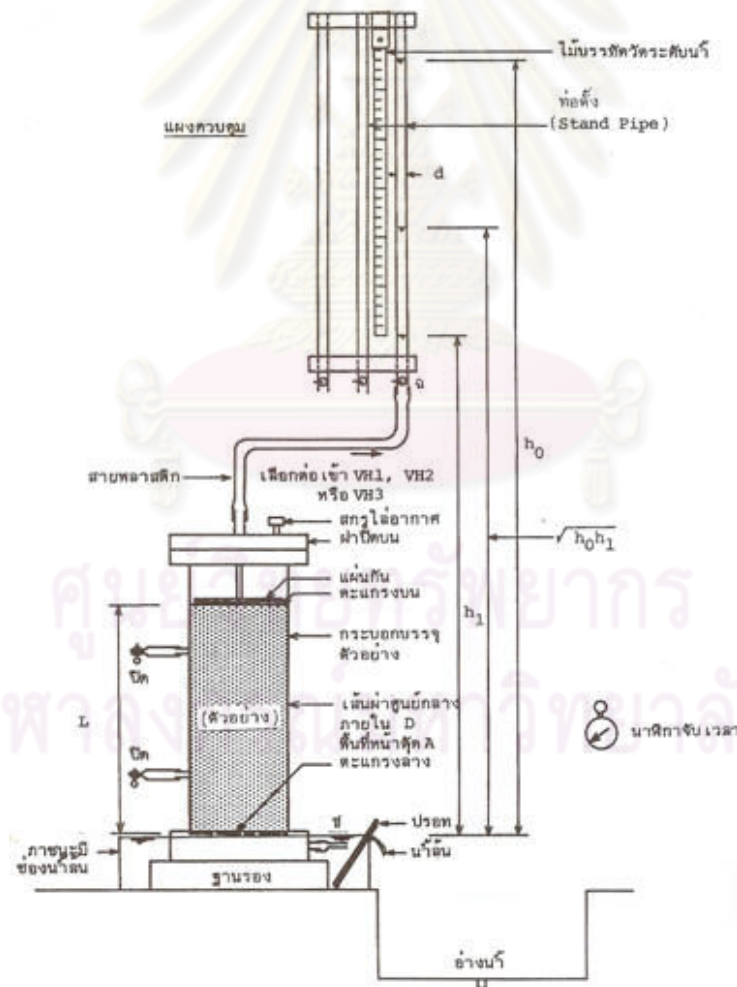
- เมื่อ Q คือ ปริมาณน้ำที่วัดระหว่างการทดสอบ (L^3), cm^3
 L_c คือ ระยะระหว่างหลอดมาโนมิเตอร์วัดระดับน้ำ (L), cm
t คือ ระยะเวลาที่ทดสอบ (T), นาที
h คือ ผลต่างระดับน้ำในหลอดมาโนมิเตอร์ (L), cm
 $h_2 - h_1$
A คือ พื้นที่หน้าตัดกระบอกตัวอย่างดิน (L^2), cm^2

2. การทดลองภายใต้สภาวะระดับน้ำเปลี่ยนแปลง เป็นวิธีทดสอบเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ที่เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ปานกลางถึงต่ำเป็นตัวอย่างดินจำพวกทรายละเอียดและดินตะกอน วิธีการดำเนินการทดสอบเริ่มต้นจากการ

ต่อเชื่อมท่อเข้ากับตัวอย่างดินที่บรรจุลงในกระบอกบรรจุตัวอย่างจากนั้นปล่อยให้ น้ำไหลผ่านตัวกลางรูปทรงแท่งโดยมีการเปลี่ยนแปลงหัวความดันของน้ำเข้าสู่ตัวอย่างดินอย่างต่อเนื่องโดยที่ระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำออกจากระบบ อธิบายดังสมการดังนี้

$$K_i = \frac{2.3a \times L}{60A(\Delta t)} \log \frac{h_0}{h_1} \quad (2-8)$$

- เมื่อ a คือ พื้นที่หน้าตัดหลอดวัดน้ำ (L^2), cm^2
 L คือ ความยาวของตัวอย่างดินในกระบอก (L), cm
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของกระบอกตัวอย่างดิน (L^2), cm^2
 Δt คือ เวลาที่ทำการทดลองปล่อยระดับน้ำจาก h_0 ถึง h_1 (T), นาที
 h_0 คือ ระยะจากผิวหน้าทำน้ำข้างล่างถึงระดับเริ่มทดลอง (L), cm
 h_1 คือ ระยะจากผิวหน้าทำน้ำข้างล่างถึงระดับเสร็จทดลอง (L), cm



รูปที่ 2-7 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ภายใต้สภาวะระดับน้ำเปลี่ยนแปลง

(สถาพร 1998)

2.6.4 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage Coefficient หรือ Storativity, S)

ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ หมายถึง ปริมาตรของน้ำที่ชั้นหินอุ้มน้ำสามารถปล่อยออกมาจากการกักเก็บต่อหน่วยพื้นที่ของชั้นน้ำใต้ดินต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงระดับหัวความดันตั้งฉากกับผิวชั้นน้ำใต้ดิน ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บนี้ไม่มีหน่วยเพราะคิดจากปริมาตรของน้ำต่อปริมาตรของชั้นหินอุ้มน้ำ ชั้นหินอุ้มน้ำปิดส่วนมากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บอยู่ระหว่าง 0.00005 และ 0.005 ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำแสดงว่าในการได้น้ำจากชั้นหินอุ้มน้ำปิดเพียงพอ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงความดันมาก

ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บสามารถหาได้โดยดำเนินการสูบทดสอบหรือวัดการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศ สำหรับในกรณีที่ต้องการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บก็สามารถใช้สมการได้ 2 วิธีกล่าวคือ สมการของทีส (Theis) และ สมการของคูเปอร์-จาคอบ (Cooper-Jacob)

1. การสูบทดสอบโดยใช้สมการของทีสใช้สมการดังนี้

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2-9)$$

เมื่อ $W(u)$	คือ Well Function
s	คือ ระดับน้ำลด (L)
h_0	คือ ระดับความดันชั้นน้ำที่เริ่มต้นของชั้นน้ำใต้ดินก่อนการสูบทดสอบ (L)
h	คือ ระดับความดันชั้นน้ำบ่อสังเกตการณ์ เมื่อเวลาผ่านไป t (L)

$$u = \frac{Sr^2}{4Tt} \quad (2-10)$$

เมื่อ S	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ
R	คือ รัศมีระยะระหว่างจุดศูนย์กลางบ่อสูบน้ำถึงจุดศูนย์กลางบ่อสังเกตการณ์ (L)
T	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (L^2/T)

จากสมการ 2-10 จัดเรียงใหม่ได้เป็น

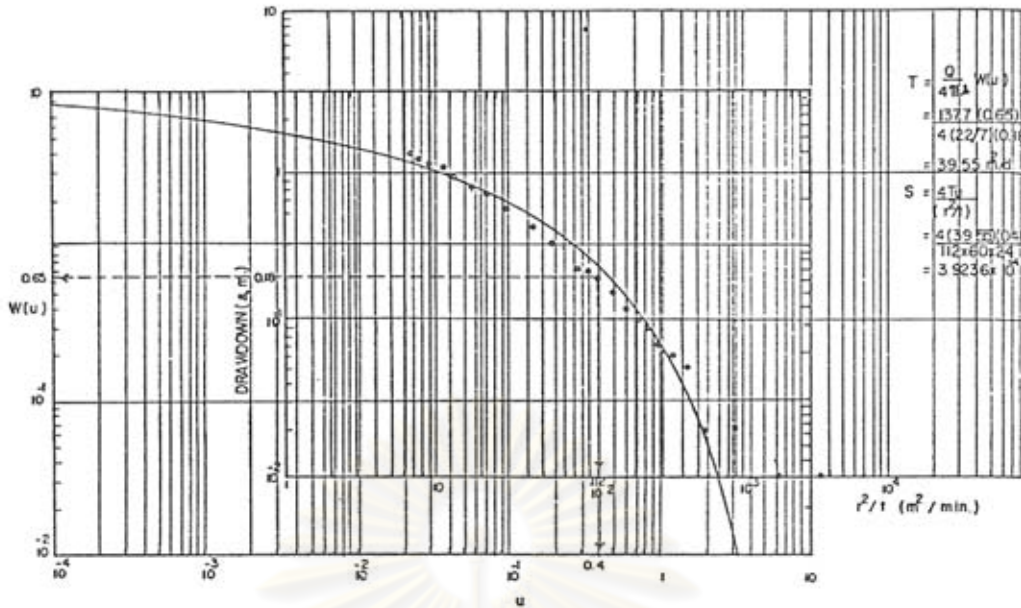
$$\frac{u(4T)}{S} = \frac{r^2}{t} \quad (2-11)$$

ในการทดลองหาค่า S และ T จะเริ่มจากการนำค่า W(u) และ u ในตารางที่ 2-2 มาพล็อตในกระดาษกราฟ ล็อก-ล็อก เพื่อสร้างเส้นโค้งไทป์ (Type Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2-7 จากนั้นนำผลการทดสอบแสดงค่าระดับน้ำลด (Drawdown) จากบ่อสังเกตการณ์ที่เวลาต่างๆกัน และค่าที่จดบันทึก r^2/t มาสร้างความสัมพันธ์ในกระดาษกราฟ ล็อก-ล็อก ที่ขนาดเดียวกันกับ เส้นโค้งไทป์ จากนั้นนำเส้นโค้งที่สร้างแล้วมาซ้อนทับกัน โดยให้แนวเส้นโค้งทั้งสองกราฟซ้อนทับกันได้มากที่สุด โดยที่แกนทั้งสองแกนจะต้องขนานกันดังรูปที่ 2-7 จากนั้นทำการอ่านค่า W(u), u, s และ r^2/t สุดท้ายนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการที่ 2-10 และ 2-11 เพื่อหาค่า S และ T ต่อไป

ตารางที่ 2-2 ค่าของ W (u) ที่ค่าต่างๆของ u

u	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
x 1	0.219	0.049	0.013	0.0038	0.0011	0.00036	0.00012	0.000038	0.000012
x 10 ⁻¹	1.82	1.22	0.91	0.70	0.56	0.45	0.37	0.31	0.26
x 10 ⁻²	4.04	3.35	2.96	2.68	2.47	2.30	2.15	2.03	1.92
x 10 ⁻³	6.33	5.64	5.23	4.95	4.73	4.54	4.39	4.26	4.14
x 10 ⁻⁴	8.63	7.94	7.53	7.25	7.02	6.84	6.69	6.55	6.44
x 10 ⁻⁵	10.94	10.24	9.84	9.55	9.33	9.14	8.99	8.86	8.74
x 10 ⁻⁶	13.24	12.55	12.14	11.85	11.63	11.45	11.29	11.16	11.04
x 10 ⁻⁷	15.54	14.85	14.44	14.15	13.93	13.75	13.60	13.46	13.34
x 10 ⁻⁸	17.84	17.15	16.74	16.46	16.23	16.05	15.90	15.76	15.65
x 10 ⁻⁹	20.15	19.45	19.05	18.76	18.54	18.35	18.20	18.07	17.95
x 10 ⁻¹⁰	22.45	21.76	21.35	21.06	20.84	20.66	20.50	20.37	20.25
x 10 ⁻¹¹	24.75	24.06	23.65	23.36	23.14	22.96	22.81	22.67	22.55
x 10 ⁻¹²	27.05	26.36	25.96	25.67	25.44	25.26	25.11	24.97	24.86
x 10 ⁻¹³	29.36	28.66	28.26	27.97	27.75	27.56	27.41	27.28	27.16
x 10 ⁻¹⁴	31.66	30.97	30.56	30.27	30.05	29.87	29.71	29.58	29.46
x 10 ⁻¹⁵	33.96	33.27	32.86	32.58	32.35	32.17	32.02	31.88	31.76

ที่มา : Todd (1980)



รูปที่ 2-8 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ห้บ่สูบน้ำ ด้วยวิธีของทิส (Todd 1980)

2. การสูบทดสอบด้วยวิธี คูเปอร์-จาคอบ พบว่าเมื่อดำเนินการทำสูบทดสอบโดยใช้ระยะเวลาการสูบน้ำมากๆ ค่าของ u จะมีค่าน้อยลง สามารถแสดงในสมการดังนี้

$$s = h_0 - h = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \tag{2-12}$$

เมื่อนำค่าระดับน้ำลด $h_0 - h$ และ ค่า t มาสร้างความสัมพันธ์ในกระดาษกราฟเซมิ-ล็อก จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยที่สามารถหาค่า S และ T นอกจากนี้กราฟเส้นตรงนี้ที่ S = 0 จะตัดแกน t ที่ $t = t_0$ ดังนี้

$$S = 2.25 \frac{Tt_0}{r^2} \tag{2-13}$$

ซึ่งค่าของ T สามารถหาได้โดย ถ้าค่าของ $t/t_0 = 10$ ดังนั้น $\log t/t_0 = 1$ เพราะฉะนั้น ถ้าเราแทนค่า s ด้วย Δs ซึ่งเป็นระดับน้ำลดต่อล็อกไซเคิล (log cycle) ของ t ดังนั้นสมการจึงได้

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta s} \tag{2-14}$$

ในการประมาณค่า T และ S ด้วยวิธีของ คูเปอร์-จาคอบ จะต้องดำเนินการสูบน้ำเป็นเวลานาน หลังจากหยุดการสูบน้ำสามารถนำค่าระดับน้ำลดมาสร้างความสัมพันธ์ในกระดาษกราฟเซมิ-ล็อกโดยให้ค่า t อยู่แกนล็อก แล้วลากผ่านกราฟเส้นตรงให้ผ่านจุดข้อมูลมากที่สุด จุดที่เส้นตรงตัดแกน t หมายถึงค่า t_0 จากนั้นนำค่า t และ Δs ที่ได้ไปแทนค่า Q และ Δs ในสมการ

2-14 จะได้ค่า T แล้วจึงนำค่า T, r และ t₀ ไปแทนค่าในสมการที่ 2-13 เพื่อหาค่า S สำหรับการประมาณค่าโดยวิธีของคูเปอร์-จาคอบ นี้จะให้ได้ผลดีเมื่อค่าของ u จะต้องน้อยกว่า 0.01

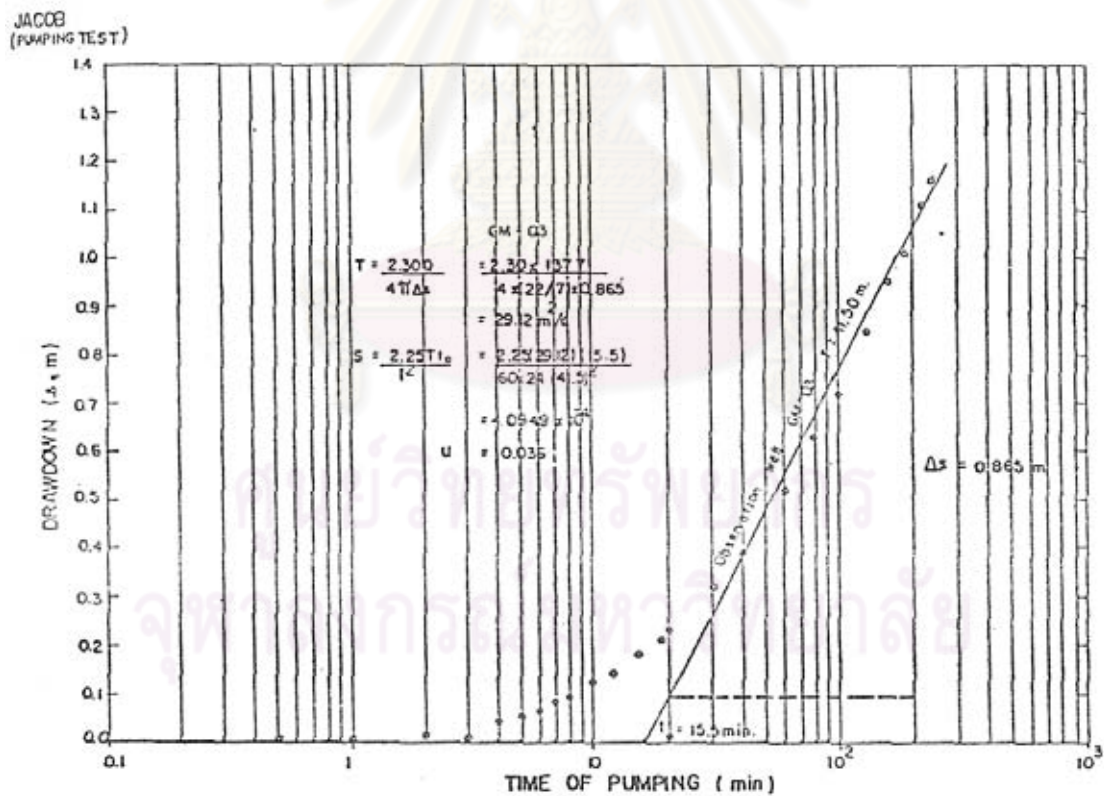
2.6.5 ความพรุน (Porosity)

ความพรุน หมายถึงอัตราส่วนระหว่างช่องว่างของตัวกลางรูพรุนต่อปริมาตรทั้งหมดของตัวอย่างดิน ความพรุนเป็นดัชนีบอกถึงความเชื่อมต่อกันของตัวกลางของแข็ง และมีผลโดยตรงต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ดังสมการนี้

$$n = \frac{V_v}{V_t} \tag{2-15}$$

- เมื่อ n คือ ความพรุน
- V_v คือ ปริมาตรของช่องว่างในตัวกลางรูพรุน
- V_t คือ ปริมาตรรวมของตัวกลางรูพรุน

ดินแต่ละประเภทมีค่าความพรุนไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2-3



รูปที่ 2-9 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ห่อสูบน้ำด้วยวิธีของคูเปอร์-จาคอบ (Todd 1980)

ตารางที่ 2-3 ความพรุนของดินแต่ละชนิด

Material	Porosity (%)
SEDIMENTARY	
Gravel, coarse	24 - 36
Gravel, fine	25 - 38
Sand, coarse	31 - 46
Sand, fine	26 - 53
Siltstone	34 - 61
Clay	34 - 60
SEDIMENTARY ROCKS	
Limestone, dolomite	0 - 20
Sandstone	5 - 30
Siltstone	21 - 41
Karst limestone	5 - 50
Shale	0 - 10
CRYSTALLINE ROCKS	
Fractured crystalline rocks	0 - 10
Dense crystalline rocks	0 - 5
Weathered granite	34 - 57
Weathered gabbro	42 - 45
Basalt	3 - 35

(Domenico and Schwartz 1990)

2.6.6 ค่าตัวประกอบความหน่วง (Retardation Factor)

สารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินสามารถถูกดูดซับโดยกระบวนการดูดซับติดผิว (Sorption) โดยเม็ดของดินที่ประกอบในชั้นน้ำใต้ดิน ส่งผลให้การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนเป็นไปช้าลงเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน อธิบายได้ดังสมการแบบ 1 มิติ ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{B_d}{\theta} \frac{\partial C^*}{\partial t} - \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{rxn} \quad (2-16)$$

(Dispersion) (Advection) (Sorption) (Reaction)

- เมื่อ
- C คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในสถานะของสารละลาย (ML^{-1})
 - t คือ เวลา (T)
 - D_L คือ สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์ (L^2/T)
 - v_x คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ย (L/T^{-1})
 - B_d คือ ความหนาแน่นรวม
 - θ คือ ความพรุนของตัวกลางอิมมัตว
 - C^* คือ ความเข้มข้นที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวกลางรูพรุน

rxn คือ ปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยาชีวรูป ปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

การศึกษาผลของกระบวนการดูดซับติดผิวต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน สามารถดำเนินการศึกษาโดยการประมาณค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับโดยตัวกลางที่เป็นรูพรุน ความสามารถของตัวกลางที่จะดูดซับสารปนเปื้อนสามารถแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์ม ซึ่งจะแสดงค่าความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในเฟสสารละลาย (Aqueous Concentration) และสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางรูพรุน (Sorbed Concentration) ถ้ากระบวนการการดูดซับ (Sorption Process) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่มีการไหล สารละลายจะอยู่ในสภาวะสมดุล (Equilibrium) เรียกว่า ความสมดุลของการดูดซับ (Equilibrium Sorption Isotherm)

การอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับของสารปนเปื้อนบนผิวของตัวกลางรูพรุน สามารถอธิบายได้ 3 ฟังก์ชันที่เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ ไอโซเทอร์มเชิงเส้น (Linear Isotherm), ไอโซเทอร์มของฟรุนดริก (Freundlich Isotherm) และไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) สำหรับการศึกษาจะใช้ฟังก์ชันไอโซเทอร์มเชิงเส้นในการอธิบายการดูดซับของสารปนเปื้อนบนผิวของตัวกลางรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2-10 ดังสมการต่อไปนี้

$$C^* = K_d C \quad (2-17)$$

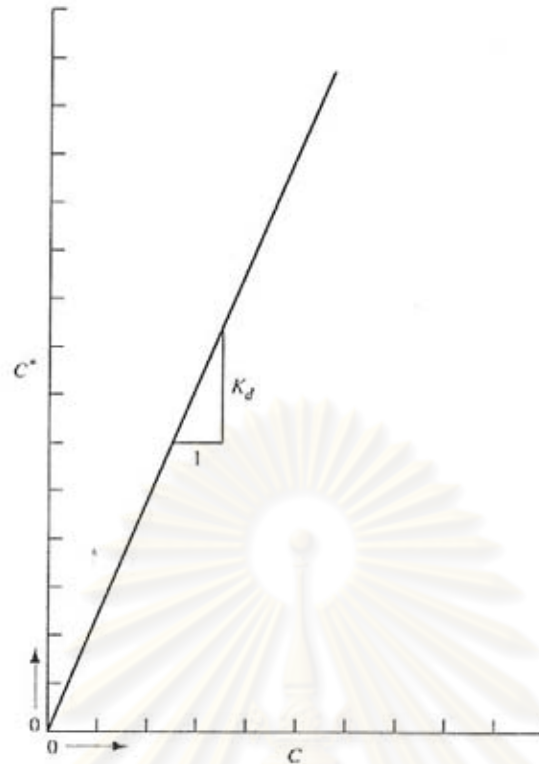
- เมื่อ C^* คือความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนตัวผิวของตัวกลางรูพรุน ต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวกลาง (M/M^{-1}), mg/kg
- C คือความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในการละลายที่สมดุลที่ผ่านการดูดซับจากตัวกลางแล้ว (ML^{-1})
- K_d คือสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Sorption Coefficient)

เมื่อนำค่าในสมการ 2-17 มาใส่ในสมการ 2-16 จะมีรูปสมการดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{B_d}{\theta} \frac{\partial (K_d C)}{\partial t} \quad (2-18)$$

ทำการปรับรูปสมการข้างต้นใหม่จะมีรูปสมการดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} \left(1 + \frac{B_d}{\theta} K_d \right) = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2-19)$$



รูปที่ 2-10 ไอโซเทอร์มเชิงเส้น (Fetter 1999)

ทำการปรับรูปสมการข้างต้นใหม่จะมีรูปสมการดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} \left(1 + \frac{B_d}{\theta} K_d \right) = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2-20)$$

เมื่อปรับรูปสมการให้อยู่ในความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบความหน่วง ดังสมการ

$$1 + \frac{B_d}{\theta} K_d = R \quad (2-21)$$

ถ้าความเร็วเฉลี่ยการไหลของน้ำใต้ดินคือ v_x และค่าเฉลี่ยความเร็วของสารปนเปื้อนคือ v_c จะสามารถหาค่าตัวประกอบความหน่วงได้ดังสมการ

$$v_c = \frac{v_x}{R} \quad (2-22)$$

2.7 การทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน

การทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน แบ่งออกได้เป็น 3 วิธีตามความเหมาะสมของขนาดเม็ดดิน และตามชนิดของดินได้แก่

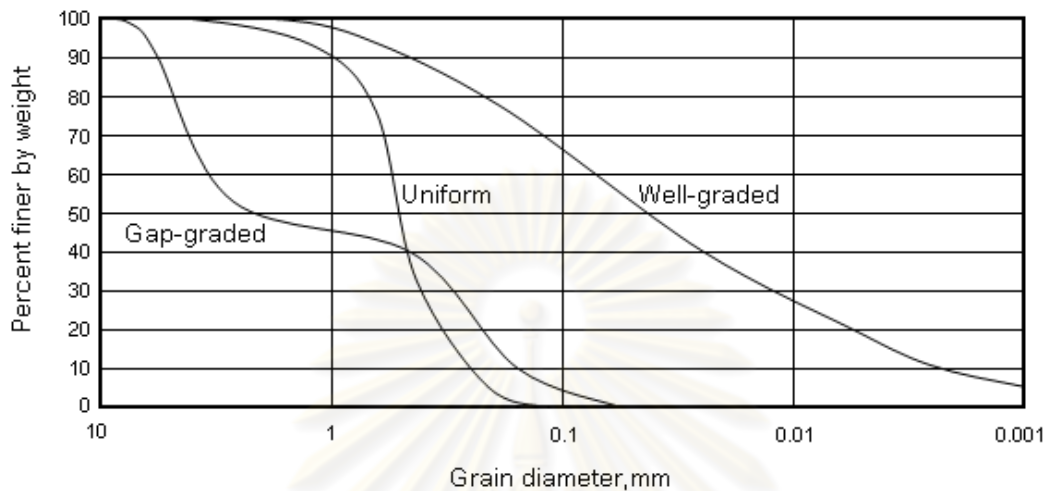
1. วิธีใช้ตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ใช้สำหรับดินที่มีเม็ดหยาบมีขนาดใหญ่กว่า ตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่
2. วิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) สำหรับดินเม็ดละเอียด เช่น ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty Clay) มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่
3. วิธีใช้ตะแกรงร่อนร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Combined Analysis, Sieve and Hydrometer) สำหรับดินที่มีเม็ดดินทั้งขนาดเม็ดใหญ่และเม็ดละเอียดปนกัน เช่น ดินกรวดปนดินเหนียว (Clayey Gravel) ทราวยปนดินเหนียว (Clayey Sand) ทราวยปนดินตะกอน (Silty Sand) เป็นต้น

การวิเคราะห์โดยวิธีการทดลองทางกายภาพจะทำให้มวลดินที่ประกอบไปด้วย Granular Materials หรือ Cohesionless Soils เช่น กรวด และทราย เป็นส่วนใหญ่หากทำการทดลองกับ Cohesive Soil จำเป็นต้องแยกเม็ดดินที่เกาะตัวอยู่ออกจากกัน ในกรณีที่เม็ดดินมีขนาดเล็กมาก ๆ (Clay Particles) การทดลองโดยวิธีการทางกายภาพจะไม่ได้ผลดี เนื่องจากไม่สามารถแยกเม็ดดินออกจากกันได้หมดและจำเป็นต้องใช้ตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาดเล็กมาก ในการทดลองวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาดเล็กมากหรือทดลองกับมวลดินที่มี Cohesive Soils ปนอยู่มากให้ได้ผลดี จะทำได้โดยอาศัยน้ำช่วยล้างเม็ดดินผ่านช่องเปิดของตะแกรง วิธีนี้เรียกว่า Wet Analysis และน้ำมีส่วนช่วยเม็ดดินที่เกาะตัวกันอยู่แยกตัวออกจากกันได้ง่ายขึ้น

ผลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเม็ดดินดังรูปที่ 2-11 เส้นโค้งที่ได้จากกราฟเรียกว่า Particle Size Distribution Curve เป็นค่าระหว่างขนาดของเม็ดดิน (บน Log Scale) และเปอร์เซ็นต์ผ่านโดยน้ำหนัก ลักษณะของ Particle Size Distribution Curve สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้

1. Well-Graded Curve เป็นเส้นโค้งที่มีลักษณะยี่ดตัวออกไปในแนวนอนและมีความชัน (Slope) น้อย แสดงว่ามวลดินประกอบไปด้วยเม็ดดินที่มีขนาดต่าง ๆ กันตั้งแต่ใหญ่ไปเล็ก มีปริมาณของเม็ดดินแต่ละขนาดเท่า ๆ กันหรือมีการกระจายขนาดของเม็ดดินสม่ำเสมอ
2. Poorly-Graded Curve หรือ Uniform Curve เป็นเส้นโค้งที่มีลักษณะตั้งชันครอบคลุมช่วงของขนาดเม็ดดินไม่มากนัก แสดงให้เห็นว่ามวลดินประกอบไปด้วยเม็ดดินที่มีขนาดใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ หรือเป็นมวลดินที่มีขนาดของเม็ดดินสม่ำเสมอ

3. Gap-Graded Curve แสดงมวลดินที่ประกอบด้วยเม็ดดินขนาดใหญ่และเล็กปนกันอยู่ แต่มีเม็ดดินขนาดกลาง ๆ น้อยมากเส้นโค้งมีลักษณะเป็น uniform curve สองเส้นเชื่อมต่อกันโดยที่เส้นโค้งมีความชันน้อยมาก



รูปที่ 2-11 ลักษณะการกระจายของเม็ดดินในมวลดิน

2.8 แบบจำลองคณิตศาสตร์

2.8.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ MODFLOW (MODular finite-difference ground-water FLOW model)

แบบจำลอง MODFLOW เป็นแบบจำลองที่นำมาใช้ในการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งนำการแก้ปัญหาแบบ Finite Difference เข้ามาประยุกต์ในการคำนวณกับทฤษฎีการไหลของน้ำใต้ดิน เพื่อวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน เนื่องจากการสูบน้ำ การเติมน้ำ (Recharge) การไหลจากแม่น้ำ การระบายน้ำ และการคายระเหย โดยที่ในตัวโปรแกรมหลักของ MODFLOW ประกอบด้วยโมดูลเล็ก ๆ หลายโมดูล ซึ่งแต่ละโมดูลถูกเรียกว่าชุดการคำนวณ (Package) โดยรายละเอียดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2-4 แสดงถึงการทำงานของชุดการคำนวณสามารถจัดกลุ่มของชุดการคำนวณได้ 3 กลุ่ม คือ

1. ชุดการคำนวณองค์ประกอบของการไหล (Flow Component Packages) ได้แก่ชุดการคำนวณ BCF, WEL, RCH, RIV, DRN, EVT และ GHB
2. ชุดการคำนวณความยาวของช่วงเวลา (Stress Package) ได้แก่ชุดการคำนวณ WEL, RCH, RIV, DRN, EVT, และ GHB
3. ชุดการคำนวณการแก้สมการ (Solver Packages) ได้แก่ชุดการคำนวณ SIP, SOR, และ PCG ซึ่งแต่ละชุดการคำนวณจะมีขั้นตอนการทำงาน (Procedures) ดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-4 รายละเอียดของชุดการคำนวณต่าง ๆ ของแบบจำลอง MODFLOW

ชื่อ Package	ตัวย่อ	รายละเอียดของ Package
Basic	BAS	จัดการงานทั้งหมดของโมเดล เช่น กำหนดขอบเขต การกำหนดความยาวของ Time Step การสร้างเงื่อนไขตั้งต้นและการพิมพ์ผลลัพธ์
Block-Centered Flow	BCF	คำนวณเทอมของสมการ Finite-Difference ซึ่งแทนที่ การไหลผ่านตัวกลางรูพรุน โดยเฉพาะการไหลจากเซลล์ไปเซลล์และการไหลเข้าไปใน Storage
Well	WEL	เทอมที่เพิ่มเข้าไปแทนการไหลจากบ่อบาดาลในสมการ Finite-Difference
Recharge	RCH	เทอมที่เพิ่มเข้าไปแทนการกระจายพื้นที่เติมน้ำในสมการ Finite-Difference
River	RIV	เทอมที่เพิ่มเข้าไปแทนการไหลจากแม่น้ำในสมการ Finite-Difference
Drain	DRN	เทอมที่เพิ่มเข้าไปแทนการไหลจากการระบายน้ำในสมการ Finite-Difference
Evapotranspiration	EVT	เทอมที่เพิ่มเข้าไปแทนที่การระเหยในสมการ Finite-Difference
General-Head Boundaries	GHB	เทอมที่เพิ่มเข้าไปแทนที่ general-head boundary ในสมการ Finite-Difference
Strongly Implicit Procedure	SIP	วิธี Iterative แก่ระบบของสมการ Finite-Difference โดยใช้ Strongly Implicit Procedure
Slice Successive Overrelaxation	SOR	วิธี Iterative แก่ระบบของสมการ Finite-Difference โดยใช้ Slice-Successive Over relaxation

2.8.1.1 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง MODFLOW

คาบเวลาของแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็นลำดับของช่วงเวลาที่น่าสนใจในการคำนวณเรียกว่า Stress Period แต่ละ Stress Period อาจแบ่งออกเป็นลำดับของ Time Step ซึ่งเป็นช่วงเวลาย่อยของ Stress Period ระบบของสมการ Finite-Difference ของสมการการไหลจะถูกสร้างขึ้น และแก้สมการในแต่ละโหนด ที่จุดสุดท้ายของแต่ละ Time Step และใช้วิธีการหาคำตอบซ้ำในการแก้สมการ เพื่อหาค่าระดับน้ำ สำหรับแต่ละ Time Step ในสภาพจำลองหนึ่ง จะมี 3 loop อยู่ข้างใน ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลักดังรูปที่ 2-12 ประกอบด้วย

- Define procedure เป็นการกำหนดสภาพปัญหาที่จำลอง เช่น ขนาดของโมเดล ชนิดของแบบจำลอง (Transient หรือ Steady-State) จำนวนของ Stress period แนวทางเลือกทางอุทกวิทยา และวิธีในการแก้ปัญหาที่ต้องการ

- Allocate Procedure เป็นการจัดสรรตำแหน่งของหน่วยความจำ

ตารางที่ 2-5 องค์ประกอบของโมดูลต่าง ๆ ตามขั้นตอนการจัดการในแต่ละชุดการคำนวณ

Procedures	Flow Component Package								Solver Package		
	BAS	Stress Package							SIP	SOR	PCG
	BAS	BCF	WEL	RCH	RIV	DRN	EVT	GHB	SIP	SOR	PCG
Define (DF)	x										
Allocate (AL)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Read & Prepare (RP)	x_u	x_{us}							x	x	x
Stress (RT)	x										
Read & Prepare (RP)			x	x_u	x	x	x_u	x			
Advance (SD)	x										
Formulate (FM)	x	x_s	x	x	x	x	x	x			
Approximate (AP)									x_s	x_s	x_s
Output Control (OC)	x										
Budget (BD)		x_{us}	x_u	x_u	x_u	x_u	x_u	x_u			
Output (OT)	x_u										

- Read and Prepare Procedure เป็นส่วนที่ข้อมูลทั้งหมดที่ไม่ใช่ฟังก์ชันของเวลา ซึ่งเป็นข้อมูลค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ระดับน้ำเริ่มต้น (Initial Head) ค่า

สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Transmissivity) สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity) ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกัก (Specific Storage) ระดับผิวน้ำและผิวล่างของชั้นน้ำต่าง ๆ และ พารามิเตอร์จำเป็นในวิธีการแก้ปัญหา และจัดเตรียมข้อมูลสำหรับขั้นตอนต่อไป

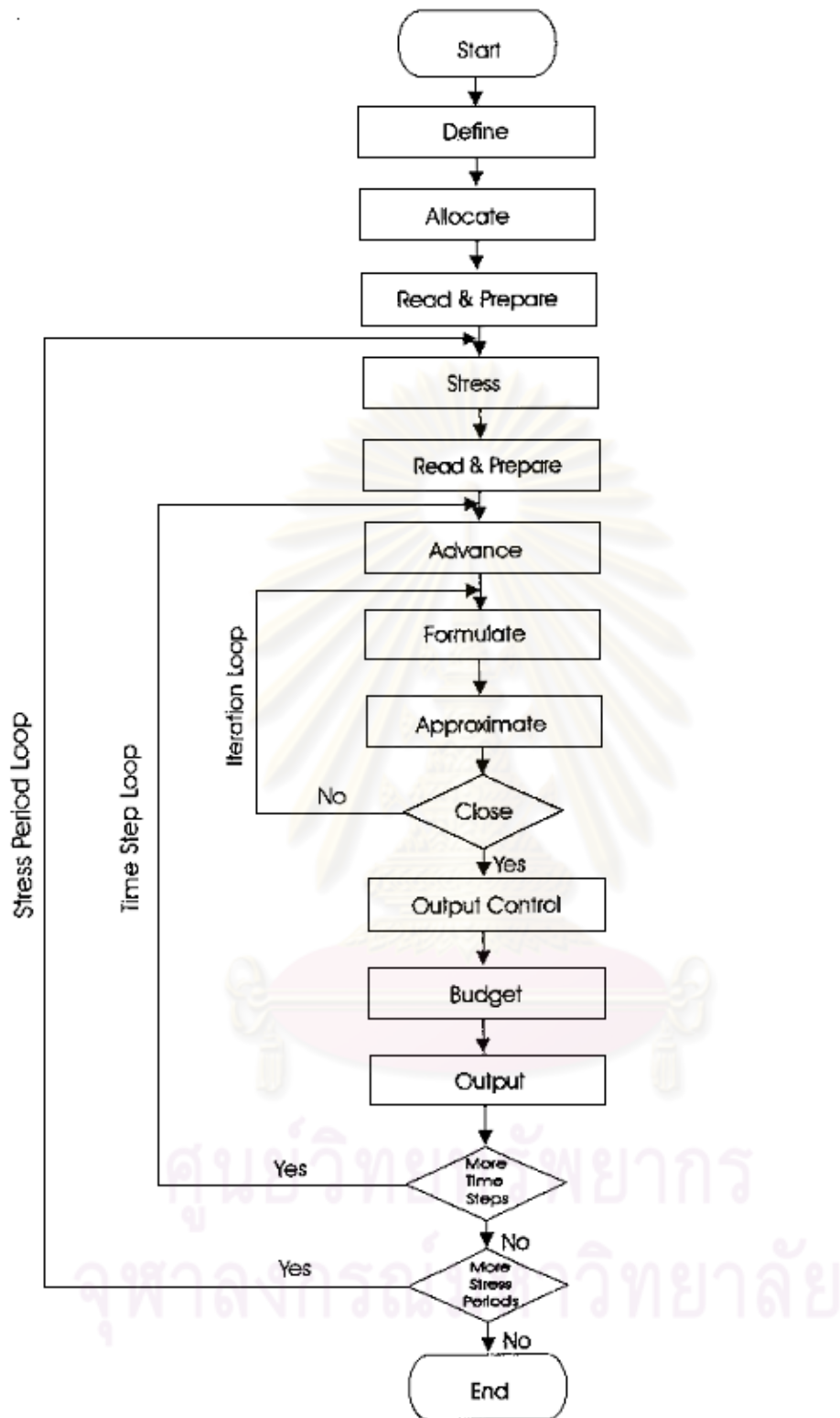
- Stress Procedure เป็นการกำหนดจำนวนความยาวของแต่ละช่วงระยะเวลา ในการคำนวณในแต่ละ stress period และข้อมูลในการคำนวณความยาวของแต่ละช่วงจะถูก อ่านค่า

- Read and Prepare Procedure เป็นการอ่านข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ Stress Period เช่น อัตราการสูบน้ำ และพื้นที่เติมน้ำจะถูกอ่านและถูกเตรียมไว้ จากนั้นจึงเข้าสู่ Time-Step Loop

- Advance Procedure ความยาวของช่วงระยะเวลาในการคำนวณจะถูก คำนวณและค่าระดับน้ำของจุดเริ่มต้นจะถูกใช้ในการเริ่มคำนวณ iteration loop

- Formulate Procedure เป็นการหาค่า Conductance และสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ สำหรับแต่ละโหนดที่จำเป็นต้องใช้ในสมการการไหล

- Approximate Procedure ซึ่งประมาณคำตอบของระบบสมการเชิงเส้นของค่า ระดับน้ำ การทำซ้ำและต่อเนื่องไปจนกระทั่งทำไปถึงค่าสูงสุดของการคำนวณซ้ำที่ยอมรับได้ที่จุด สุดท้ายของ Iteration Loop หรือคำนวณจนไปถึงค่าผิดพลาดที่กำหนด



รูปที่ 2-12 โครงสร้างของโปรแกรมหลักของแบบจำลอง MODFLOW

- Output Control Procedure เป็นการกำหนดความต้องการของข้อมูลที่ต้องการได้ เช่น ค่าระดับน้ำที่คำนวณได้ เทอมลวด (Budget Term) และการไหลของเซลล์ต่อเซลล์ (Cell-by-Cell Flow Term) ซึ่งถูกบันทึกไว้

- Output Procedure เป็นการแสดงผลทั้งหมดที่กำหนดไว้ใน output control procedure

2.8.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D (A Modular 3-Dimensional Multi-Species Transport Model)

แบบจำลอง MT3D (A Modular Three-Dimension Transport Model) เป็นแบบจำลองที่นำมาใช้ในการจำลองสภาพการแพร่เนื่องจากการไหลของน้ำ (Advection) การแพร่กระจาย (dispersion) และปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction) ของสารละลายที่อยู่ในระบบน้ำใต้ดิน โครงสร้างของแบบจำลองนี้มีลักษณะเป็นโมดูลเช่นเดียวกับแบบจำลอง MODFLOW ซึ่งแบบจำลองการเคลื่อนที่ของมวลสาร MT3D นี้ใช้วิธี Mixed Eulerian-Lagrangian ในการแก้สมการการแพร่ของสารละลาย (Hydrodynamic Dispersion Equation) 3 มิติ โดยที่แบบจำลอง MT3D จะอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไม่มีผลต่อการไหล และ MT3D นำระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงและอัตราการไหล และเทอม Sink/Source (ตำแหน่งที่มีการเติมน้ำหรือดึงน้ำออกจากระบบชั้นน้ำ) ของแบบจำลอง MODFLOW มาใช้ ซึ่งแบบจำลอง MT3D ระบุสภาพทางอุทกธรณีเช่นเดียวกับแบบจำลองการไหล MT3D ซึ่งต้องระบุถึง (1) ชนิดของชั้นน้ำ (2) ความลาดของชั้นน้ำและความหนา (3) ความเข้มข้นและขอบเขตของการไหลมวลสาร (4) ผลกระทบของการเคลื่อนที่ ของสารละลาย Sources และ Sink ภายนอก เช่น บ่อบาดาล การระบายน้ำ แม่น้ำ การเติมน้ำ และการคายระเหย

2.8.2.1 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง MT3D

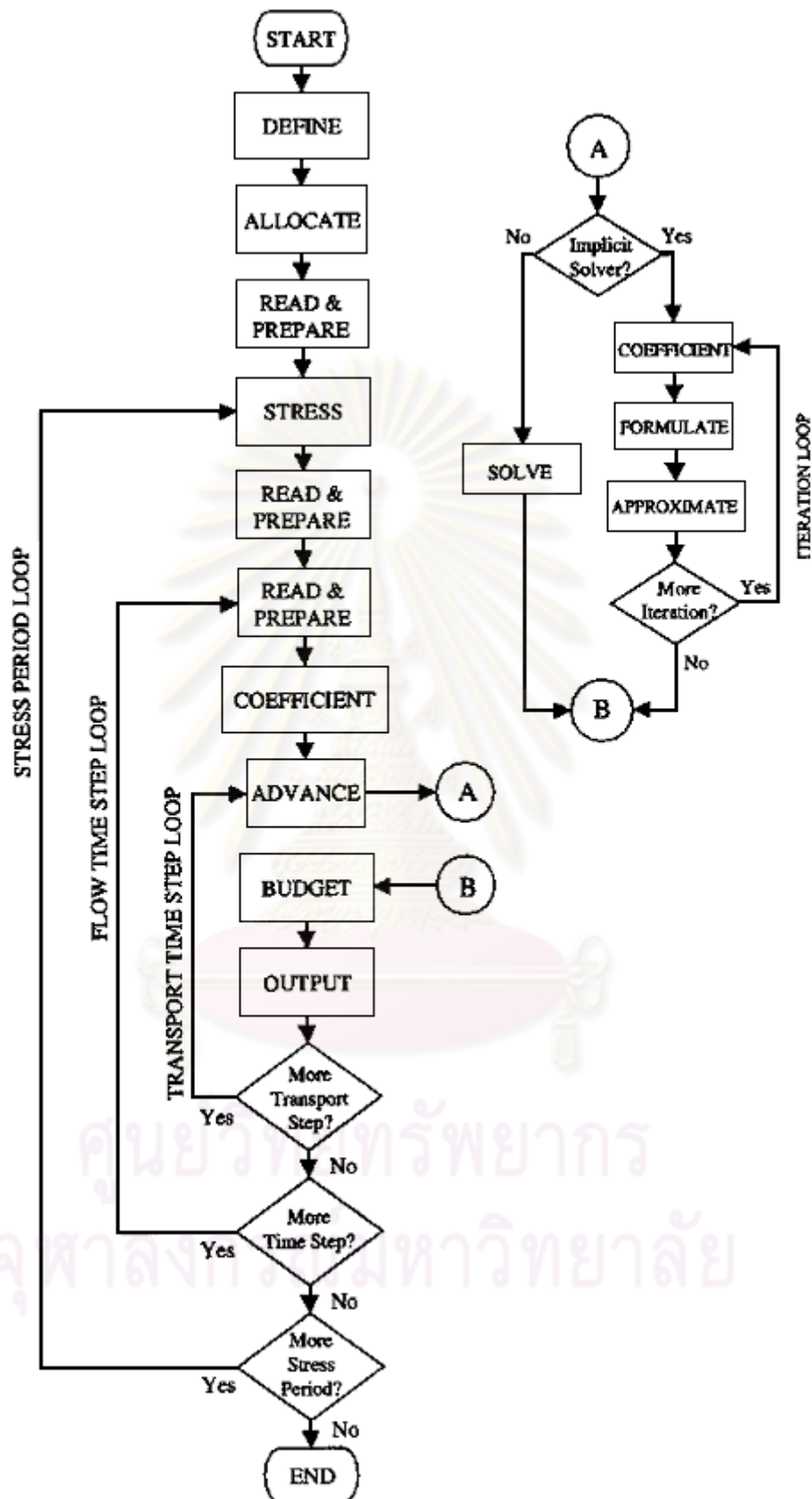
โปรแกรมแบบจำลองการเคลื่อนที่ MT3D เป็นโครงสร้างโปรแกรมที่ใช้โมดูลเช่นเดียวกับโมเดล MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) โมเดล MT3D ประกอบด้วยโปรแกรมหลักและโปรแกรมน้อย ๆ ที่เป็นอิสระต่อกันเป็นจำนวนมาก ซึ่งรวมอยู่ในเป็นชุดการคำนวณ แต่ละชุดการคำนวณจะจัดการเกี่ยวกับการจำลองสภาพการเคลื่อนที่ ความคล้ายคลึงของโครงสร้างโปรแกรมและการออกแบบระหว่าง MT3D และ MODFLOW ช่วยให้มีความสะดวกต่อการใช้งานร่วมกัน ขั้นตอนของแบบจำลองการเคลื่อนที่ MT3D ดังรูปที่ 2-13 แบ่งออกเป็น

- Define procedure เป็นการกำหนดสภาพปัญหาของแบบจำลอง และสภาพ

ขอบเขตต่าง ๆ เช่น ขนาดของโมเดล จำนวนของ stress periods และ transport option ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองสภาพ

ตารางที่ 2-6 รายละเอียดของชุดการคำนวณต่าง ๆ ของแบบจำลอง MT3D

ชื่อ Package	ตัวย่อ	รายละเอียดของ packages
Basic Transport	BTN	จัดการพื้นฐานที่จำเป็นตลอดทั้งโมเดล เป็นการให้นิยามปัญหา การระบุสภาพขอบเขตและเงื่อนไขตั้งต้น กำหนด Stepsize จัดเตรียม Mass Balance Information และการแสดงผลของการจำลอง
Head and Flow File	HFF	เชื่อมโยงกับแบบจำลอง MODFLOW ผ่าน Unformatted Disk File ที่มี Heads และ Flow Terms ซึ่ง HFF Package จะอ่านและจัดเตรียม Heads และ Flow Terms ที่จำเป็นสำหรับโมเดล Transport
Advection	ADV	แก้สมการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเนื่องจาก Advection ด้วยหนึ่งในสามวิธีของ Eulerian-Lagrangian Scheme : MOC, MMOC หรือ HMOC
Dispersion	DSP	แก้สมการการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเนื่องจาก Dispersion ด้วยวิธี Explicit Finite Difference
Sink & Source Mixing	SSM	แก้สมการการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเนื่องจาก Sink & Source Mixing ด้วยวิธี Explicit Finite Difference ประกอบด้วย Well, Drains, Rivers, Recharge และ Evapotranspiration
Chemical Reaction	RCT	แก้สมการการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเนื่องจาก Chemical Reaction ประกอบด้วย Linear หรือ Nonlinear Sorption isotherms และ First-Order Irreversible Rate Reaction
Utility	UTL	บรรจุโมดูลใช้งาน ซึ่งเรียกใช้จากโมดูลหลัก เพื่อแสดงวัตถุ ประสงค์ของการใช้งาน เช่น Input/Output ของ Data Arrays



รูปที่ 2-13 โครงสร้างของโปรแกรมหลักของแบบจำลอง MT3D

- Allocate Procedure เป็นการจัดสรรหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ระบุในขั้นตอนกำหนดขอบเขต

- Read and Prepare Procedure ครั้งที่ 1 เป็นข้อมูลที่ใช้ในการจำลองสภาพจะถูกอ่านและจัดเตรียม ซึ่งจะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับสภาพของขอบเขต สภาพะตั้งต้นของความเข้มข้นพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ พารามิเตอร์ของสารละลายและการแสดงผลลัพธ์

- Stress Procedure เป็นการกำหนดจำนวนของความยาวของแต่ละช่วงระยะเวลาในการคำนวณแต่ละ Stress Period และข้อมูลในการคำนวณความยาวของแต่ละช่วงจะถูกอ่านค่า

- Read and Prepare Procedure ครั้งที่ 2 เป็นการอ่านค่าข้อมูลเกี่ยวกับ stress period เช่น การระบุความเข้มข้นของ sources หรือ sink โมเดลการเคลื่อนที่ที่ได้รับตำแหน่ง ชนิดและอัตราการไหลของ sources และ sinks ทั้งหมดที่จำลองโมเดลการไหลภายใน time step loop

- Read and Prepare Procedure ครั้งที่ 3 เป็นการอ่านและจัดเตรียมระดับน้ำ (hydraulic heads) และเทอมการไหลที่เก็บไว้ในโมเดลการไหล รวมเข้าไว้กับสภาพขอบเขตทางอุทกวิทยาที่ระบุไว้

- Coefficient Procedure เป็นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นค่าคงที่ในแต่ละ time step ของ head solution เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Dispersion Coefficient)

- Advance Procedure เป็นการกำหนดขนาด Stepsize ที่เหมาะสม สำหรับใช้คำนวณในแต่ละ Transport step

- Solve Procedure เป็นการแก้สมการ Transport Component ด้วยวิธี Explicit Mixed Eulerian-Lagrangian และคำนวณมวลที่เข้าหรือออกของชั้นน้ำในแต่ละ Component

- Budget Procedure เป็นการคำนวณและจัดการสมดุลของมวลสาร

- Output Procedure เป็นการแสดงผลการจำลองตามสภาพที่ระบุไว้ใน Output Control Options

ศูนย์วิทยพัชร์พอ กิ่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองกายภาพ และแบบจำลองคณิตศาสตร์

การศึกษาพฤติกรรมในระดับห้องปฏิบัติการและจำลองลักษณะการชะละลายและการเคลื่อนที่ของไนเตรทในระบบชั้นน้ำใต้ดินอิมิตัว แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การทดลองในแบบจำลองทางกายภาพ และ 2. การจำลองโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

3.1 แบบจำลองทางกายภาพ

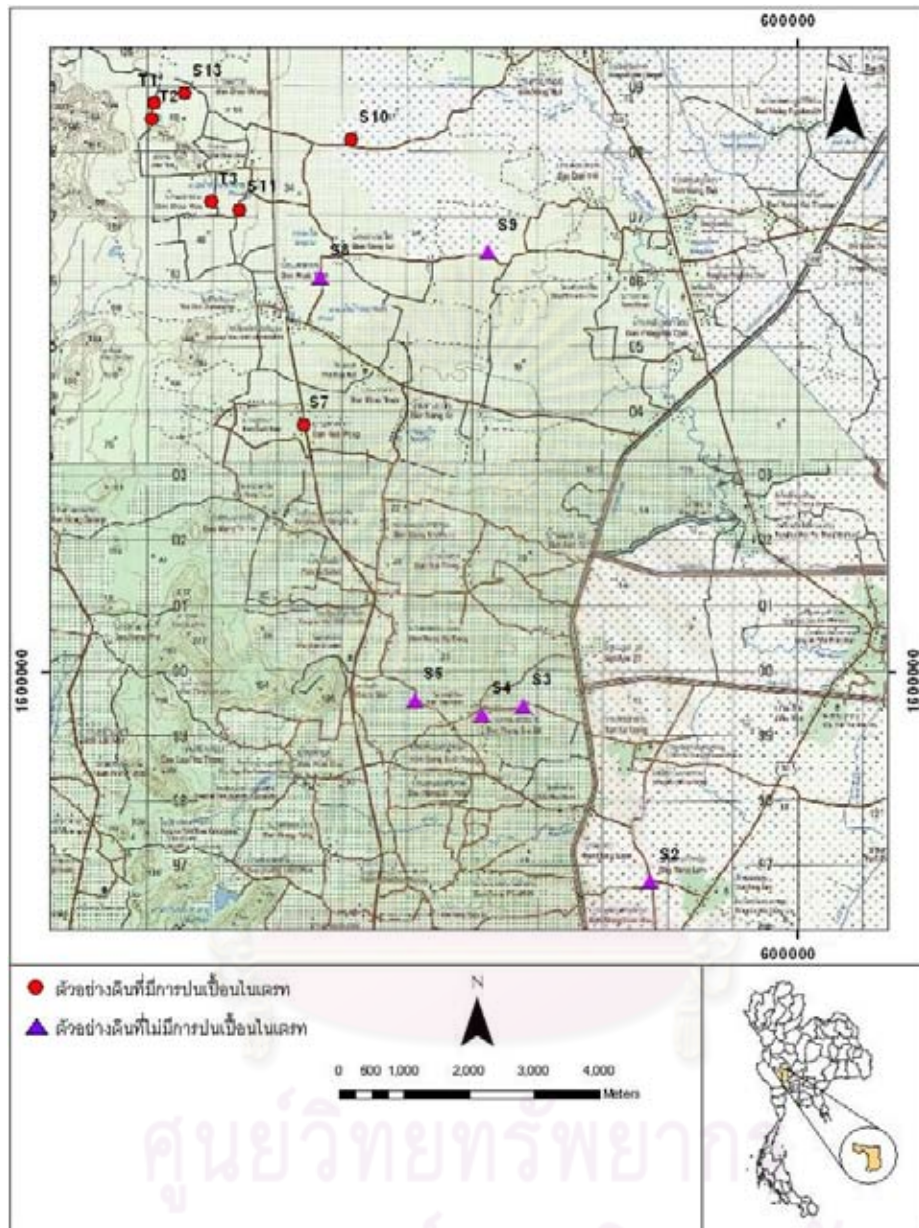
3.1.1 ลักษณะตัวกลางรูพรุนสำหรับการทดลอง

ตัวกลางรูพรุนที่ใช้ในการทดลองได้จากพื้นที่ศึกษาใน อ.คูทอง จ.สุพรรณบุรี โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ตัวกลางรูพรุนที่ไม่มีการปนเปื้อนไนเตรท จำนวน 6 ตัวอย่าง และตัวกลางรูพรุนที่มีการปนเปื้อนไนเตรทจำนวน 6 ตัวอย่าง ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดินแสดงในรูปที่ 3-1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดินประกอบด้วย 1. สว่านมือ 2. ถุงพลาสติกเพื่อใช้รวบรวมตัวอย่างดิน และ 3. กล่องโฟมบรรจุน้ำแข็งสำหรับรักษาสภาพดิน การเก็บตัวอย่างดินมีขั้นตอนการเก็บดังนี้ (กรมวิชาการเกษตร 2548)

1. จุดเก็บตัวอย่างดินไม่ควรเป็นทางเดินเก่า ขอบรั้ว คอกสัตว์ หรือกองปุ๋ยเก่า และความลึกของตัวอย่างดินที่เก็บอยู่ต่ำกว่าผิวดินประมาณ 1-2 เมตร
2. ทำความสะอาดผิวดินบริเวณที่กำหนด จากนั้นใช้สว่านมือเจาะดิน ต้องตั้งเครื่องมือให้ตั้งฉากกับผิวดินแล้วกดลงไปเก็บตัวอย่างดินและดึงขึ้นตรง ๆ นำดินส่วนที่ได้ใส่ในถังพลาสติก
3. เทดินกองบนแผ่นพลาสติก คลุกเคล้าให้เข้ากัน พูนดินให้เป็นกองและทำเครื่องหมายวงบนยอดกองดิน แบ่งดินออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กันนำดินมา 1 ส่วน ประมาณหนึ่งกิโลกรัม
4. บรรจุดินลงในถุงพลาสติกโดยรักษาสภาพดินให้คงสภาพ ระบายละเอียดและตำแหน่งที่เก็บจากนั้นบรรจุดินลงในกล่องน้ำแข็ง เพื่อลดอัตราการเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีในดิน

หลังจากเก็บตัวอย่างดินแล้ว ได้นำดินมาดำเนินการจำแนกขนาดเม็ดดินโดยวิธีการวิเคราะห์การกระจายขนาดของเม็ดดินทางกายภาพ โดยนำดินมาร่อนผ่านตะแกรงขนาดของช่องเปิดเท่ากัน หรือ Sieve Analysis สำหรับตะแกรงที่ใช้ในการทดลองเป็นตะแกรงที่มีช่องเปิดมาตรฐาน รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีหมายเลขแสดงขนาดของช่องเปิดของตะแกรงกำกับอยู่ด้วย ในการปฏิบัติ นำตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาดต่าง ๆ มาวางซ้อนเป็นชั้น ๆ ให้ตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิดขนาดใหญ่กว่าอยู่ชั้นบน และมีที่รองรับ (Pan) อยู่ชั้นล่างสุด นำมวลดินที่ซังน้ำหนักแล้วเทใส่

ตะแกรงชั้นบนสุดแล้วนำเข้าเครื่องสั่น (Vibrator) เพื่อช่วยให้เม็ดดินลอดผ่านช่องเปิดของตะแกรงได้สะดวกขึ้น



รูปที่ 3-1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน

การทดลองหาการกระจายขนาดเม็ดดินในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองแบบ Wet Sieve Analysis โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำดินตัวอย่างที่เก็บจากพื้นที่ศึกษามาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 โดยใส่ดินลงในตะแกรงเบอร์ 200 จากนั้นเปิดน้ำให้ไหลผ่านเม็ดดิน เพื่อให้เม็ดดินหลุดออกจากกันโดยมีที่รองรับดินที่ถูกชะล้างแล้วด้านล่าง

2. นำดินที่ถูกล้างและดินที่ค้างบนตะแกรงจากที่รองรับไปเข้าเตาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. นำดินที่แห้งแล้วไปทำการวิเคราะห์โดยวิธีใช้ตะแกรงร่อน
4. ทำการทดลองซ้ำโดยใช้ตัวอย่างดินที่เหลือโดยแยกดินที่ไม่มีการปนเปื้อนในเตรทจำนวน 6 ตัวอย่าง และดินที่มีการปนเปื้อนในเตรทจำนวน 6 ตัวอย่าง
5. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเม็ดดินและเปอร์เซ็นต์ผ่านโดยน้ำหนัก
6. แบ่งกลุ่มชุดดินโดยแบ่งดินที่ไม่มีการปนเปื้อนและดินที่มีการปนเปื้อนออกได้ดังนี้
ดินที่ไม่มีการปนเปื้อนในเตรท

ดินทดลองชุดที่ 1 ประกอบด้วยดินตัวอย่าง S2

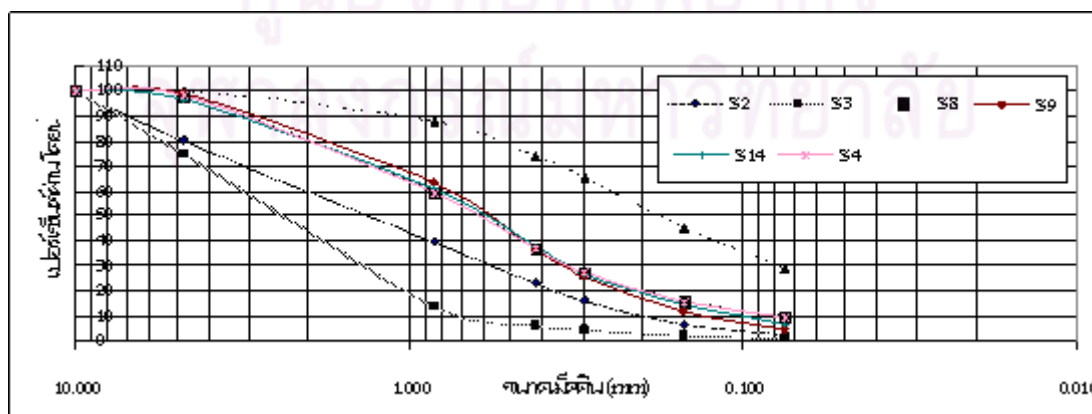
ดินทดลองชุดที่ 2 ประกอบด้วยดินตัวอย่าง S3

ดินทดลองชุดที่ 3 ประกอบด้วยดินตัวอย่าง S4, S8, S9 และ S14

เมื่อจำแนกดินโดยระบบ Unified Soil Classification ดังรูปที่ 3-4 ดินทดลองชุดที่ 1 และ 3 เป็นทรายมีขนาดคละกันดี (SW) และดินทดลองชุดที่ 2 เป็นทรายปนกรวด (SP)

ตารางที่ 3-1 ขนาดคละของดินที่ไม่มีการปนเปื้อนในเตรท

ขนาดเม็ดดิน (mm)	เปอร์เซ็นต์ผ่านโดยน้ำหนัก					
	S2	S3	S4	S8	S9	S14
10.00	100	100	100	100	100	100
4.76	80.57	74.56	98.50	98.50	98.67	96.69
0.84	39.37	13.79	59.00	59.00	63.2	61.14
0.42	23.5	6.24	37.13	37.13	36.62	37.81
0.30	16.32	4.32	27.58	27.58	25.43	26.98
0.15	6.87	2.43	15.81	15.81	11.45	14.43
0.08	3.04	1.36	9.40	9.40	4.32	6.95



รูปที่ 3-2 ขนาดคละของดินตัวอย่างที่ไม่มีการปนเปื้อนในเตรท

ดินที่มีการปนเปื้อนไนเตรท

ดินทดลองชุดที่ 4 ประกอบด้วยดินตัวอย่าง S7, S10

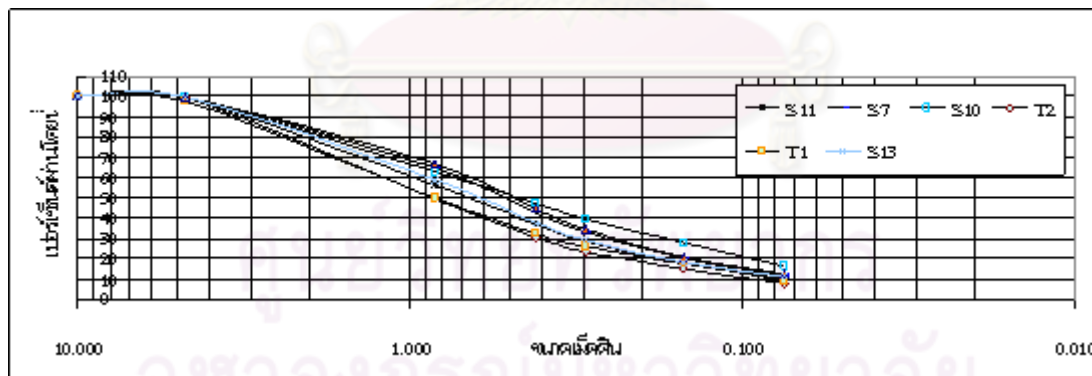
ดินทดลองชุดที่ 5 ประกอบด้วยดินตัวอย่าง S11

ดินทดลองชุดที่ 6 ประกอบด้วยดินตัวอย่าง S13, T1 และ T2

เมื่อจำแนกดินโดยระบบ Unified Soil Classification ดังรูปที่ 3-4 ดินทดลองชุดที่ 4, 5 และ 6 เป็นทรายมีขนาดคละกันดี (SW)

ตารางที่ 3-2 ขนาดคละของดินที่มีการปนเปื้อนไนเตรท

ขนาดเม็ดดิน (mm)	เปอร์เซ็นต์ผ่านโดยน้ำหนัก					
	S7	S10	S11	S13	T1	T2
10.000	100	100	100	100	100	100
4.760	99.88	99.67	99.34	99.68	97.9	99.8
0.840	65.01	62.99	56.29	58.57	49.81	49.28
0.420	42.61	47.01	36.94	37.77	32.28	30.44
0.297	32.75	39.77	28.62	29.27	25.82	23.57
0.150	20.37	27.75	17.35	18.18	17.48	14.59
0.075	11.69	15.89	9.78	11.15	9.03	7.83



รูปที่ 3-3 ขนาดคละของดินตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนไนเตรท

เมื่อพิจารณาการแบ่งกลุ่มชุดดินที่ไม่มีการปนเปื้อนไนเตรท และกลุ่มชุดดินที่มีการปนเปื้อนไนเตรท พบว่าลักษณะของกราฟของกลุ่มชุดดินที่ไม่มีการปนเปื้อนไนเตรท กราฟจะจับกลุ่มในลักษณะห่าง ๆ กันเนื่องจากจุดที่เก็บตัวอย่างดินอยู่ไกลกัน ส่วนกราฟของกลุ่มชุดดินที่มีการปนเปื้อนไนเตรทจะจับกลุ่มรวมกัน เนื่องจากจุดเก็บตัวอย่างอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน

UNIFIED SOIL CLASSIFICATION INCLUDING IDENTIFICATION AND DESCRIPTION						
COARSE GRAINED SOILS <small>More than half maximum <math>D_{60}</math> from No. 200 sieve size</small>	FIELD IDENTIFICATION PROCEDURES <small>(excluding particles larger than 3 inches and having fractions or estimated weights)</small>		GROUP SYMBOLS	TYPICAL NAMES	INFORMATION REQUIRED FOR DESCRIBING SOILS	LABORATORY CLASSIFICATION CRITERIA
	<small>More than half maximum <math>D_{60}</math> from No. 200 sieve size</small> <small>More than half maximum <math>D_{60}</math> from No. 4 sieve size</small>	<small>Wide range in grain size and substantial amounts of all intermediate particle sizes</small> <small>Primarily one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing</small> <small>Non-plastic fines (for identification procedures see CL below)</small>	<small>GW</small> <small>GP</small>	<small>Well graded gravels, gravel-sand mixtures, silts or no fines</small> <small>Fairly graded gravels, gravel-sand mixtures, silts or no fines</small>	<small>One typical name, indicate approximate percentage of sand and gravel, mass size, angularity, surface condition, and hardness of the coarse grains, local or geological name and other pertinent descriptive information, and symbol in parentheses</small>	<small>For undisturbed soils add information on stratification, degree of compaction, cementation, moisture conditions and drainage characteristics</small>
<small>More than half maximum <math>D_{60}</math> from No. 200 sieve size</small> <small>More than half maximum <math>D_{60}</math> from No. 4 sieve size</small>	<small>Wide range in grain sizes and substantial amount of all intermediate particle sizes</small> <small>Primarily one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing</small> <small>Non-plastic fines (for identification procedures see CL below)</small>	<small>GM</small> <small>GC</small>	<small>Well graded sands, gravelly sands, silts or no fines</small> <small>Fairly graded sand, gravelly sands, silts or no fines</small>	<small>EXAMPLE</small> <small>Silty sand gravelly, about 20% hard, angular gravel particles - in maximum size, rounded and subangular sand grains coarse to fine, about 10% non-plastic fines with low dry strength, well compacted and moist or plain, silty sand, (SM)</small>	<small>For undisturbed soils add information on stratification, degree of compaction, cementation, moisture conditions and drainage characteristics</small>	<small>Greater than 6</small> <small>Between one and 3</small> <small>Not meeting all gradation requirements for GM</small> <small>Above "A" line with PI greater than 7</small> <small>Above "A" line with PI between 4 and 7 are liquid limit classes requiring use of dual symbols</small>
	<small>Wide range in grain sizes and substantial amount of all intermediate particle sizes</small> <small>Primarily one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing</small> <small>Non-plastic fines (for identification procedures see CL below)</small>	<small>SM</small> <small>SP</small>	<small>Well graded silts, gravelly silts, silts or no fines</small> <small>Fairly graded silt, gravelly silts, silts or no fines</small>	<small>EXAMPLE</small> <small>Silty sand, about 20% hard, angular gravel particles - in maximum size, rounded and subangular sand grains coarse to fine, about 10% non-plastic fines with low dry strength, well compacted and moist or plain, silty sand, (SM)</small>	<small>For undisturbed soils add information on stratification, degree of compaction, cementation, moisture conditions and drainage characteristics</small>	<small>Greater than 4</small> <small>Between one and 3</small> <small>Not meeting all gradation requirements for SM</small> <small>Above "A" line with PI greater than 7</small> <small>Above "A" line with PI between 4 and 7 are liquid limit classes requiring use of dual symbols</small>
FINE GRAINED SOILS <small>More than half maximum <math>D_{60}</math> from No. 200 sieve size</small>	IDENTIFICATION PROCEDURES (ON FRACTION SMALLER THAN NO. 40 SIEVE SIZE)					
	<small>None to slight</small> <small>Medium to high</small> <small>Slight to medium</small> <small>Slight to medium</small> <small>High to very high</small> <small>Medium to high</small>	<small>Quick to slow</small> <small>None to very slow</small> <small>Slow</small> <small>Slow to none</small> <small>None</small>	<small>None</small> <small>Medium</small> <small>Slight</small> <small>Slight to medium</small> <small>Slight to medium</small>	<small>ML</small> <small>CL</small> <small>OL</small> <small>CH</small> <small>OH</small>	<small>Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sand with slight plasticity</small> <small>Inorganic clays of low to medium plasticity, sandy silts, silty clays, lean clays</small> <small>Organic silts and organic silts of low plasticity</small> <small>Inorganic silts, micaceous or fibrous fine sands or silty silts, silty silts</small> <small>Inorganic clays of high organic plasticity</small> <small>Organic clays of medium to high plasticity</small>	<small>One typical name, indicate degree and character of plasticity, amount and maximum size of coarse grains, color in wet condition, odor if any, local or geological name, and other pertinent descriptive information, and symbol in parentheses</small>
<small>Highly identified by color, odor, sponge test and frequently by fibrous texture</small>			<small>PI</small>	<small>Peat and other organic soils</small>	<small>One typical name, indicate degree and character of plasticity, amount and maximum size of coarse grains, color in wet condition, odor if any, local or geological name, and other pertinent descriptive information, and symbol in parentheses</small>	<small>For undisturbed soils add information on structure, stratification, consistency in undisturbed and remolded states, moisture and drainage conditions</small>

รูปที่ 3-4 การแบ่งชนิดดินโดยระบบ Unified Soil Classification



รูปที่ 3-5 ลักษณะของดินตัวอย่างชุดที่ 1



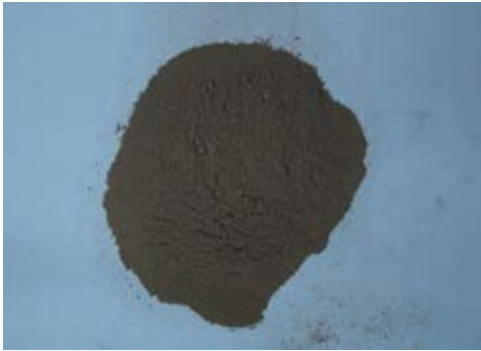
รูปที่ 3-6 ลักษณะของดินตัวอย่างชุดที่ 2



รูปที่ 3-7 ลักษณะของดินตัวอย่างชุดที่ 3



รูปที่ 3-8 ลักษณะของดินตัวอย่างชุดที่ 4



รูปที่ 3-9 ลักษณะของดินตัวอย่างชุดที่ 5



รูปที่ 3-10 ลักษณะของดินตัวอย่างชุดที่ 6

3.1.2 การวัดความนำไฟฟ้า ความเข้มข้นเกลือคลอไรด์และวัดความเข้มข้นไนเตรท

3.1.2.1 ความนำไฟฟ้า

เครื่องวัดความนำไฟฟ้าใช้เครื่อง Microprocessor Conductivity Meter การวัดความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าจากแบบจำลองกายภาพโดยค่าความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเกลือคลอไรด์ เครื่อง Microprocessor Conductivity Meter ยี่ห้อ WTW รุ่น LF325 มีค่าที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.000007–0.2 mol/l หรือ 1-24,800 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ($\mu\text{S}/\text{cm}$) มีค่าความไวต่อการวัดน้อยกว่า 20 วินาที และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิ -5 ถึง 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3-11 เครื่องวัดความนำไฟฟ้า Microprocessor Conductivity Meter

3.1.2.2 การวัดความเข้มข้นไนเตรท

เครื่องวัดความเข้มข้นไนเตรทที่ใช้ในการศึกษานี้คือเครื่อง Nitrate Ion Selective Electrode ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น ORION 9300BNWP 93 Series Electrode Body สามารถวัดความเข้มข้นของไนเตรทในช่วง 0.1 ppm – 14,000 ppm ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 40 องศาเซลเซียส

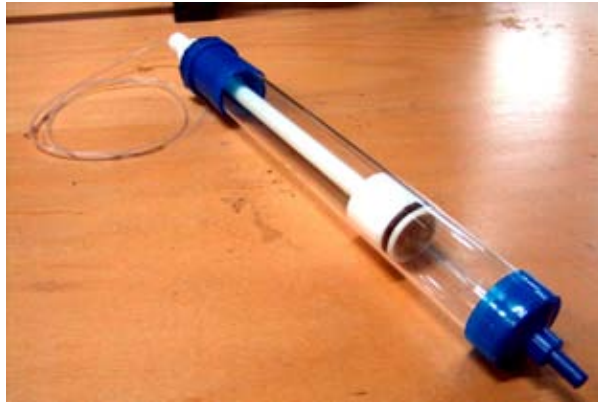


รูปที่ 3-12 เครื่องวัดความเข้มข้นไนเตรท Nitrate Ion Selective Electrode

3.1.3 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.3.1 คอลัมน์

ชุดแบบจำลองทางกายภาพเพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของไนเตรทเป็นคอลัมน์ทำจากแก้ว (Borosilicate Glass) ยี่ห้อ Kontes รุ่น Economic Flex Column รหัส 420400 มีความยาว 20 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ใช้ร่วมกับฝาปิดคอลัมน์ (Flow Adaptor) ทำจากเทฟลอน (Teflon) ยี่ห้อ Kontes รุ่น Flow Adaptor Economic Flex Column รหัส 420415 เมื่อประกอบชุดคอลัมน์กับฝาปิดคอลัมน์และฝาปิดคอลัมน์เข้าด้วยกันจะมีลักษณะดังรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-13 คอลัมน์และฝาปิดคอลัมน์

3.1.3.2 เครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำ ใช้สำหรับนำสารเทอร์เซอร์และไนเตรทเข้าสู่คอลัมน์ สำหรับเครื่องสูบน้ำที่เลือกใช้เป็นเครื่องสูบน้ำยี่ห้อ Harvard Apparatus รุ่น PHD2000 Infusion/Withdraw 70-2001 ใช้ประกอบคู่กับกระบอกฉีดน้ำแรงดันสูง (High Pressure Stainless Steel Syringes) ขนาดความจุ 200 มิลลิลิตร ยี่ห้อ Harvard Apparatus



รูปที่ 3-14 เครื่องสูบน้ำและกระบอกฉีดน้ำแรงดันสูงเมื่อประกอบเข้าด้วยกัน

3.1.3.3 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างEffluent

อุปกรณ์เก็บตัวอย่างสารที่ผ่านคอลัมน์ออกมาเป็นหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร



รูปที่ 3-15 หลอดแก้วเก็บตัวอย่างสาร

3.1.4 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยสารเทอร์เซอร์ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา (Conservative Tracer) โดยการศึกษาจะใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เนื่องจากสารเทอร์เซอร์เป็นสารที่ไม่ถูกดูดซับด้วยตัวกลางรูพรุน สำหรับสารปนเปื้อนไนเตรทใช้โซเดียมไนเตรท (NaNO_3) ในการศึกษา การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนทำการทดลองในแบบจำลองคอลัมน์และผสมสารละลายเทอร์เซอร์ และสารละลายไนเตรทเข้าด้วยกันโดยที่ความเข้มข้นของ ไนเตรทใช้ความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกับหลักฐานความเข้มข้นที่มีการเก็บตัวอย่างได้ในพื้นที่ศึกษา

การเตรียมสารละลายเทอร์เซอร์จากโซเดียมคลอไรด์ เตรียมโดยใช้สารละลายมาตรฐานที่ใช้มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อวัดจากเครื่องวัดความนำไฟฟ้า ประมาณ 2,110 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เนื่องจากความเข้มข้นในช่วงนี้มีความเหมาะสมไม่มากหรือน้อยเกินไปเครื่องวัดความนำไฟฟ้าสามารถอ่านค่าความนำไฟฟ้าที่ละเอียดที่สุดได้

สำหรับการเตรียมสารละลายไนเตรท 1 ชุดความเข้มข้นทำได้โดยนำสารโซเดียมไนเตรท จำนวน 6.07 กรัม มาละลายในน้ำ Milli Q ปริมาตร 1 ลิตรในบีกเกอร์ จะได้สารละลายไนเตรทที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นจึงปิเปตสารละลายไนเตรท 40 มิลลิลิตร ลงในขวดที่บรรจุน้ำ Milli Q 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำขวดที่ผสมสารกวนสารให้เข้ากันโดยใช้เครื่องผสมแบบ หมุนวน (Vortex-Mixture) จะได้สารละลายไนเตรทที่มีความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 3-16 ขวดมีฝาปิดสำหรับเก็บสารละลายในเตรท

3.1.5 วิธีการทดลอง

3.1.5.1 การบรรจุดินในคอลัมน์และการหาปริมาตรช่องว่าง (Pore Volume)

การศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มจากการจำลองลักษณะของชั้นน้ำอิ่มตัวโดยการเตรียมดินในคอลัมน์แก้วโดยบรรจุดินภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3-17 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. นำตัวอย่างดินที่อบแห้งแล้วและน้ำ Milli-Q ที่เตรียมไว้ไปชั่งน้ำหนัก
2. เทน้ำ Milli Q ที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแล้วลงในคอลัมน์ ให้น้ำมีความสูงประมาณ 5 มิลลิเมตร

3. เทดินอบแห้งที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแล้วลงในคอลัมน์ ให้ระดับดินต่ำกว่าระดับผิวน้ำประมาณ 2 มิลลิเมตร

4. นำคอลัมน์ไปวางบนเครื่องกวนผสมแบบหมุนวนเป็นเวลาประมาณ 15 วินาที เพื่อให้ฟองอากาศภายในคอลัมน์ออก และให้เม็ดดินเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอ

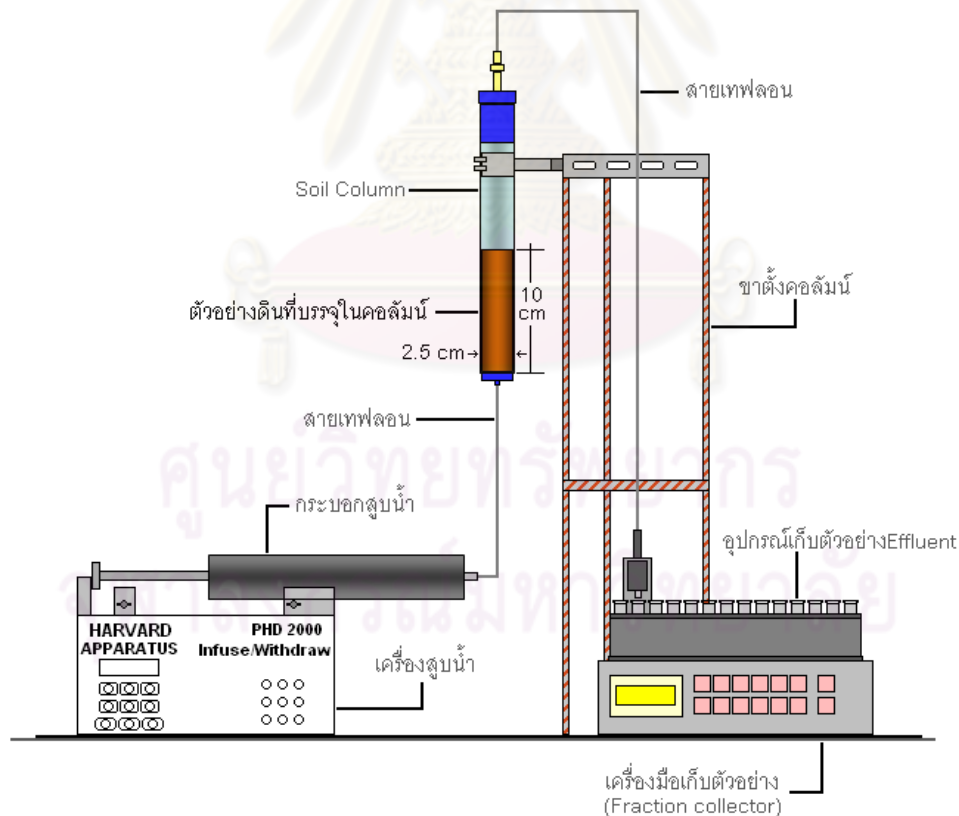
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-4 จนกระทั่งดินในคอลัมน์มีความสูง 10 เซนติเมตร

6. คำนวณหาปริมาตรช่องว่างในดินทดลองจากน้ำหนักของน้ำและดินที่เหลือจากการบรรจุคอลัมน์ โดยหาน้ำหนักน้ำและดินทั้งหมดที่บรรจุลงในคอลัมน์ น้ำหนักของน้ำในคอลัมน์ภายใต้สภาวะอิ่มตัวคือปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง ค่าความพรุนของตัวกลางรูพรุนสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของดินในคอลัมน์ ปริมาตรช่องว่างของดินทดลองคือเวลาที่น้ำไหลผ่านช่องว่างในเม็ดดินในคอลัมน์ตั้งแต่จุดที่เริ่มปล่อยน้ำไปจนถึงจุดน้ำออกที่ปลายคอลัมน์ จะนำไปใช้ในการออกแบบเก็บจำนวนตัวอย่างและเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 3-17 การบรรจุดินในคอลัมน์

รูปที่ 3-18 แสดงไดอะแกรมแบบจำลองกายภาพ เริ่มต้นจากเครื่องสูบน้ำแรงดันสูงดันกระบอกสูบน้ำแรงดันสูงที่บรรจุสารผ่านสายเทฟลอนเข้าสู่คอลัมน์บรรจุตัวกลางรูพรุน น้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์จะถูกเก็บโดยเครื่องเก็บตัวอย่างอัตโนมัติ (Fraction Collector) ตามเวลาที่กำหนด ชุดอุปกรณ์การทดลองจริงแสดงดังรูปที่ 3-19



รูปที่ 3-18 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์การทดลองการเคลื่อนตัวของเทอร์เซอร์และไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนในระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3-19 ชุดอุปกรณ์การทดลองการเคลื่อนตัวของเทอร์เซอร์และไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

3.1.5.2 การศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของสารละลายเทอร์เซอร์และสารละลายไนเตรทในแบบจำลองทางกายภาพ

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของสารละลายเทอร์เซอร์และสารละลายไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนนั้นได้ดำเนินการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพที่พัฒนาขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ส่วนผสมของสารทั้งสองชนิด ได้แก่ สารละลายเทอร์เซอร์ความเข้มข้น 2,110 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร หรือเทียบเท่ากับ 9.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายไนเตรทความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น Influent ของคอลัมน์ Effluent จากคอลัมน์จะถูกเก็บทุก ๆ 5 นาที เพื่อตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าโดยเครื่อง Microprocessor Conductivity Meter และค่าความเข้มข้นไนเตรทโดยใช้ Nitrate Ion Selective Electrode ซึ่งจะทำให้สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายแต่ละชนิดได้อย่างถูกต้องในช่วง 0.1 ppm – 14,000 ppm

ขั้นตอนการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของสารละลายเทอร์เซอร์และสารละลายไนเตรทในแบบจำลองทางกายภาพ สรุปได้ดังนี้

1. แบ่งชุดดินที่ใช้ทดลอง ได้แก่ดินทดลองชุดที่ 1, 2 และ 3
2. กำหนดอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง
3. สูบสารละลายเทอร์เซอร์และสารละลายไนเตรทเข้าสู่ระบบอกสูบบแบบ Air Tight ทำจากโลหะปลอดสนิม ทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 0.2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลอง เป็นเวลา 3 เท่าของปริมาตรช่องว่างดินทดลอง (Pore Volume)

4. เปลี่ยนจากสารละลายเทอร์เซอร์และสารละลายไนเตรทเป็นน้ำ Milli-Q และดำเนินการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 0.2 ช่วงของปริมาตรช่องว่างดินทดลองอย่างต่อเนื่อง วัดความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ออกมาโดยทำการวัดตัวอย่างละ 3 ครั้ง และนำมาหาค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารปนเปื้อน จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายเทอร์เซอร์และสายละลายไนเตรทใน Effluent มีค่าต่ำกว่า 2% ของความเข้มข้นสารละลายใน Influent

5. ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน (Falling Head Method)

6. สิ้นสุดชุดการทดลอง 1 ชุดการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของสารละลายเทอร์เซอร์และสารละลายไนเตรทในแบบจำลองทางกายภาพได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-3

เมื่อพิจารณาอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองและคำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ผลการทดลองที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 22 และการทดลองที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 34 จากการศึกษาโดย Todd (1980) พบว่าการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ซึ่งเป็นการไหลที่ก่อให้เกิดสภาวะสมดุลทางเคมี (Equilibrium) มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 10 แต่ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในแบบจำลองทางกายภาพโดย Putthividhya (2004) พบว่าที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ยังคงให้สภาวะสมดุลทางเคมี ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดใช้อัตราการไหลที่ 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ยังคงสภาวะสมดุลทางเคมีและอัตราการไหลที่ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เพื่อทดสอบสภาพการไหลที่อาจก่อให้เกิดสภาวะไม่สมดุลทางเคมี (Nonequilibrium Conditions)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3-3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลอง

อัตราการไหล (ml/hr)	พารามิเตอร์	ดินทดลอง	ดินทดลอง	ดินทดลอง
		ชุดที่ 1 (S2)	ชุดที่ 2 (S3)	ชุดที่ 3 (S8)
40	ปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง (มิลลิลิตร)	20.76	20.15	20.19
	เวลาในการเก็บตัวอย่าง 1 ปริมาตรช่องว่าง ดินทดลองในคอลัมน์ (นาที)	31.14	30.23	30.29
	ระยะเวลาการฉีดเทอร์เซอร์และไนเตรทเข้าไป ในคอลัมน์ (นาที)	93.42	90.69	90.87
	ความพรุน	0.42	0.41	0.41
	เรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynold Number)	22	22	22
	Hydraulic Conductivity (เซนติเมตรต่อวัน)	15.65	20.12	5.80
	Transmissivity (ตารางเซนติเมตรต่อวัน)	39.12	50.30	14.50
60	ปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง (มิลลิลิตร)	20.76	20.15	20.19
	เวลาในการเก็บตัวอย่าง 1 ปริมาตรช่องว่าง ดินทดลองในคอลัมน์ (นาที)	21.00	20.15	20.19
	ระยะเวลาการฉีดเทอร์เซอร์และไนเตรทเข้าไป ในคอลัมน์ (นาที)	63.00	60.45	60.57
	ความพรุน	0.42	0.41	0.41
	เรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynold Number)	34	34	34
	Hydraulic Conductivity (เซนติเมตรต่อวัน)	15.65	20.12	5.80
	Transmissivity (ตารางเซนติเมตรต่อวัน)	39.12	50.30	14.50

การศึกษาการเคลื่อนที่ของสารเทอร์เซอร์ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา (Conservative Tracer) โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ปล่อยผ่านตัวกลางรูพรุนในแบบจำลอง ภายใต้สภาวะอัตราการไหลคงที่ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้ถูกบรรจุลงในระบบอกซิดแบบ Air Tight ทำจากโลหะปลอดสนิม และนำเข้าระบบโดยเครื่องสูบน้ำที่ตั้งค่าอัตราการไหลเท่ากับ 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดำเนินการเก็บตัวอย่างจากคอลัมน์ทุกๆ 0.2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลองเป็นเวลา 2 ของปริมาตรช่องว่างดินทดลอง จากนั้นเปลี่ยนการสูบ

จากสารละลายไซเตียมคลอไรด์เป็นน้ำ Milli-Q จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 0.2 เท่าของปริมาตรช่องว่างดินทดลองต่อเนื่อง จนกระทั่งความเข้มข้นของสารเทรเซอร์ใน Effluent มีค่าต่ำกว่าประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นใน Influent ตัวอย่างที่เก็บจะนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนด้วยเครื่องวัดความนำไฟฟ้าต่อไป

3.1.5.3 การศึกษาพฤติกรรมการชะละลายของไนเตรทจากตัวกลางรูพรุนในแบบจำลองทางกายภาพ

การศึกษากฎการชะละลายของไนเตรทในคอลัมน์ดำเนินการโดยใช้ดินตัวอย่างที่ผ่านการแบ่งกลุ่มและหาขนาดคละของเม็ดดินจากพื้นที่ศึกษาที่ปนเปื้อนไนเตรทจำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างดินชุดที่ 4 (S10) ตัวอย่างดินชุดที่ 5 (S11) และตัวอย่างดินชุดที่ 6 (S13) ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.1.1 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. แบ่งชุดดินที่จะนำมาทดลองได้แก่ ดินทดลองชุดที่ 4 (S10) ดินทดลองชุดที่ 5 (S11) และดินทดลองชุดที่ 6 (S13)
2. นำตัวอย่างดินมาคำนวณหาปริมาณไนเตรทเริ่มต้น ก่อนทำการทดลองการชะละลายโดยแบ่งดินตัวอย่างออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กันโดยมีน้ำหนักตัวอย่างละ 3 กรัม จากนั้นนำตัวอย่างดินใส่ในบีกเกอร์ 3 บีกเกอร์ เติมน้ำ Milli-Q ลงไป 6 ml ลงในตัวอย่างดิน
3. ผสมดินและน้ำ Milli-Q เข้าด้วยกันให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสารและเครื่องหมุนวนแม่เหล็ก (Stir Bar and Magnetic Stirrer)
4. วัดความเข้มข้นของไนเตรทในสถานะสารละลาย โดยใช้เครื่องวัดความเข้มข้นไนเตรท Nitrate Ion Selective Electrode
5. บันทึกค่าความเข้มข้นของไนเตรท
6. นำน้ำ Milli-Q และดินตัวอย่างที่อบแห้งแล้วไปชั่งหาน้ำหนักก่อนบรรจุในคอลัมน์
7. เทน้ำที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแล้วลงในคอลัมน์ให้มีความสูงประมาณ 5 มิลลิเมตร
8. เทดินที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแล้วลงในคอลัมน์ให้ระดับดินต่ำกว่าระดับผิวน้ำประมาณ 2 มิลลิเมตร
9. นำคอลัมน์ไปวางบนเครื่องกวนผสมแบบหมุนวนเป็นเวลาประมาณ 15 วินาทีเพื่อไล่ฟองอากาศภายในคอลัมน์
10. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 7-9 จนกระทั่งความสูงของดินในคอลัมน์เท่ากับ 10 เซนติเมตร
11. ตั้งค่าอัตราการไหลของน้ำที่เครื่องสูบน้ำแบบ Piston ตามที่ได้ออกแบบไว้

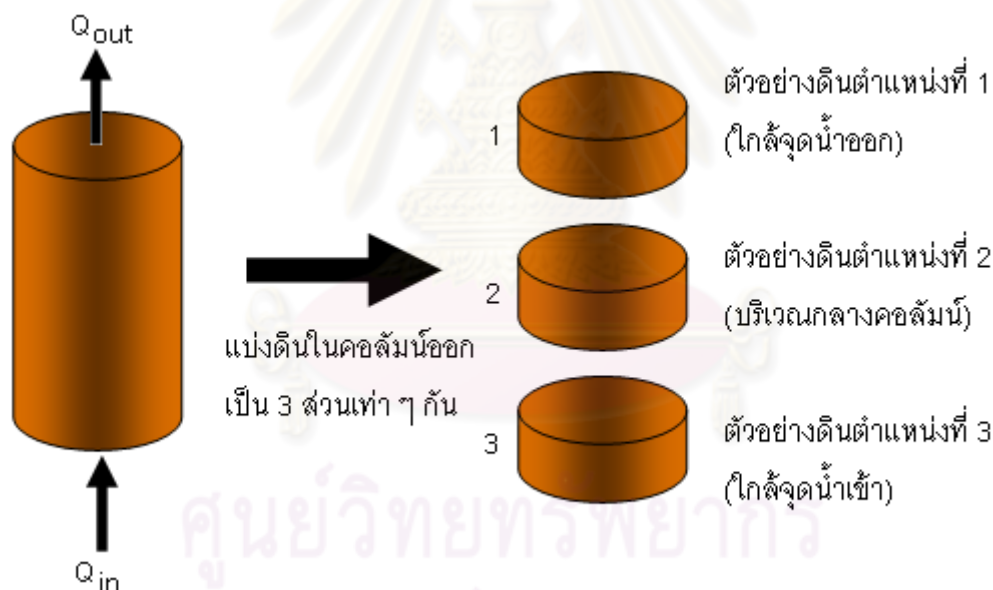
12. คำนวณหาปริมาตรช่องว่างในดินทดลองจากน้ำหนักของน้ำและดินที่เหลือจากการบรรจุคอลัมน์โดยการนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักน้ำและดินทั้งหมดที่ใช้ในคอลัมน์ น้ำหนักของน้ำในคอลัมน์คือปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง น้ำหนักของดินในคอลัมน์นำไปคำนวณหาค่าความพรุน การคำนวณหาปริมาตรช่องว่างของดินทดลองจะนำไปใช้ในการออกแบบเก็บจำนวนตัวอย่างและเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

13. ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ Milli-Q ให้ไหลผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหลคงที่ และเก็บตัวอย่างน้ำจากคอลัมน์ตามเวลาที่คำนวณได้ในชุดการทดลอง

14. วัดค่าความเข้มข้นของไนเตรทด้วยเครื่องวัดความเข้มข้นไนเตรท Nitrate Ion Selective Electrode บันทึกผลการทดลอง

15. ทำการทดลองทั้งหมด 8 ปริมาตรช่องว่างดินทดลอง

16. เมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง แบ่งดินจากคอลัมน์ออกมา 3 ส่วน อย่างละเท่า ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3-20



รูปที่ 3-20 แผนภาพแสดงการแบ่งตัวอย่างดินจากคอลัมน์เพื่อนำมาหาปริมาณไนเตรทที่ตกค้างในคอลัมน์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

17. นำดินทดลองที่แบ่งแล้วผสมกับน้ำ Milli-Q กวนผสมโดย Magnetic Stirrer จากนั้นจึงวัดความเข้มข้นไนเตรทที่คงเหลือในดินตัวอย่าง

3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมแบบจำลอง MODFLOW ในแพ็คเกจ GMS6.0 เพื่อจำลองการไหลของน้ำบาดาล ซึ่งจำลองโดยหลัก Finite Difference ซึ่งมีสมการหลักที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3-1)$$

เมื่อ

K_x , K_y , K_z คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) ในแนวแกน x, y, z [LT^{-1}]

H คือ ระดับแรงดันน้ำบาดาล [L]

W คือ การเติมน้ำ (+) หรือสูบน้ำออก (-) ต่อหน่วยปริมาตร [L^3T^{-1}/L^3]

S_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บเฉพาะ (Specific Storage) [L^{-1}]

t คือ เวลา [T]

โปรแกรมการวิเคราะห์และคำนวณการแพร่กระจายมลสารในน้ำบาดาลใช้แบบจำลอง MT3DMS (Mass Transport Three-Dimension Multi-Species Transport Model) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำบาดาล และสามารถจำลองสถานการณ์การนำพาสารปนเปื้อนในน้ำบาดาล และสามารถจำลองสถานการณ์การนำพาสารปนเปื้อน ตลอดจนการสลายตัวของสารปนเปื้อนในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้ มีสมการหลักที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s + \sum R_n \quad (3-2)$$

เมื่อ

C คือ ความเข้มข้นของมลสารที่ละลายในน้ำ [ML^{-3}]

t คือ เวลา [T]

x_i คือ ระยะทาง [L]

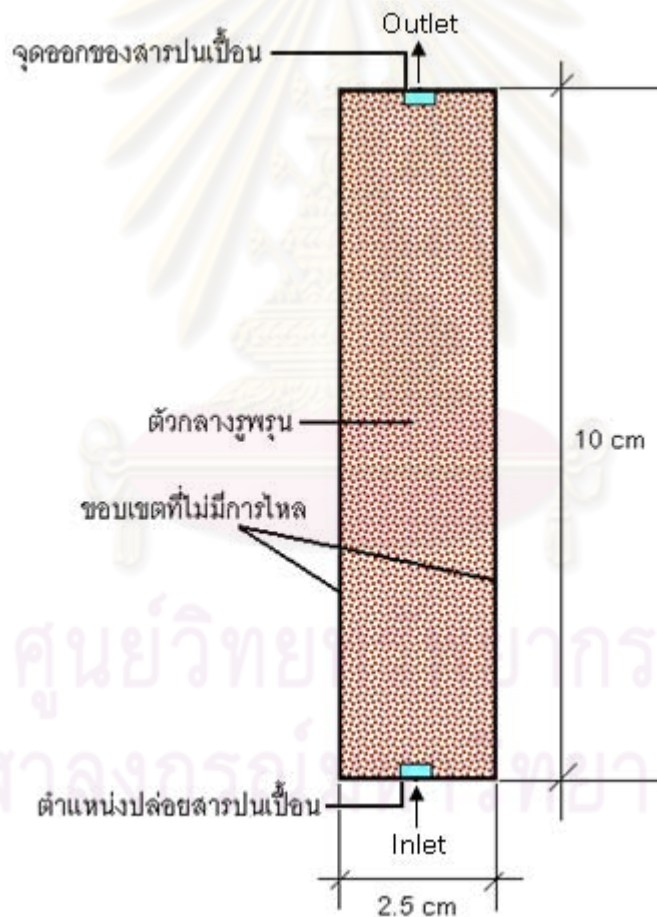
D_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Hydrodynamic dispersion coefficient) [L^2T^{-1}]

v_i คือ ความเร็วจริงเฉลี่ย (Linear Pore Water Velocity) [LT^{-1}]

- q_s คือ อัตราการไหลของน้ำเข้าหรือน้ำออก ต่อหน่วยปริมาตรของชั้นน้ำ [T]
 C_s คือ ความเข้มข้นของมลสาร ณ จุดที่เข้าสู่แหล่งน้ำบาดาล [ML^{-3}]
 R_n คือ มวลที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในขณะที่มีการเคลื่อนที่ [$ML^{-3}T^{-1}$]

3.2.1 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของการเคลื่อนที่ของไนเตรตผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวในระดับห้องปฏิบัติการ

การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของการเคลื่อนที่ของไนเตรตผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวในระดับห้องปฏิบัติการ เป็นการรวบรวมและประยุกต์ลักษณะทางกายภาพของชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อพัฒนาเป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการในการศึกษาแสดงในรูปที่ 3-21



รูปที่ 3-21 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการ

3.2.2 ข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการคาดการณ์แพร่กระจายของไนเตรทในชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาในระดับ Field Scale

3.2.2.1 การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์จำลองการไหลของน้ำใต้ดิน

การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์เป็นการสร้างภาพรวมของแหล่งน้ำบาดาลที่อาศัยข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ ข้อมูลอุทกธรณีวิทยา อุทกวิทยา สภาพอุทกธรณีวิทยา ค่าระดับน้ำบาดาล ทิศทางการไหลของน้ำบาดาล และสภาพภูมิประเทศ นำมาประมวลผลสรุปผลข้อมูลเชิงพื้นที่และตัวเลข โดยนำข้อมูลที่ได้มาใช้ออกแบบกริดการจำลองน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์การเปรียบเทียบแบบจำลองน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์ในขั้นตอนต่อไป

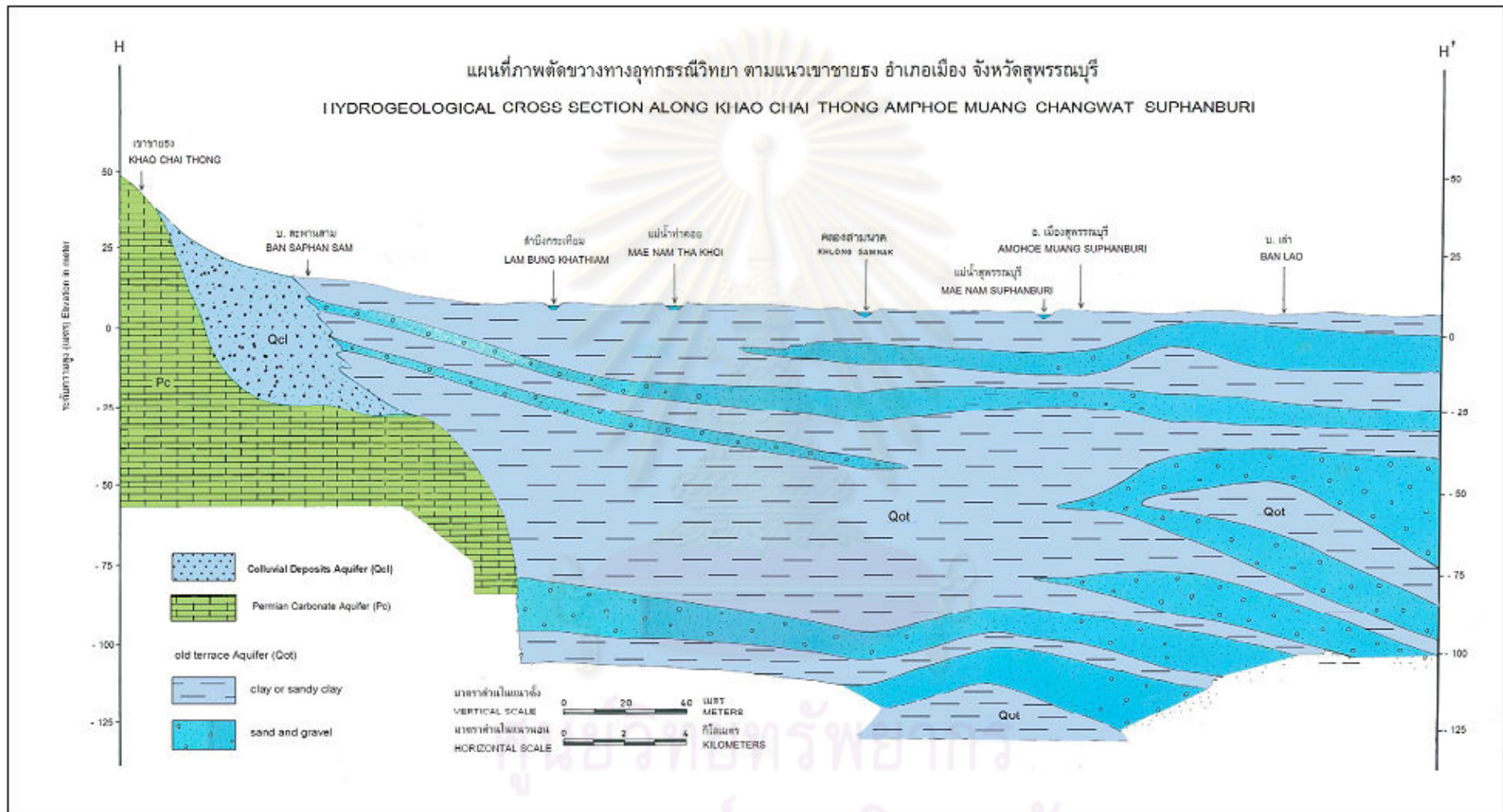
แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของแอ่งน้ำบาดาล ประกอบด้วย ขอบเขตของแหล่งน้ำบาดาลหรือพื้นที่ศึกษา (กว้าง x ยาว x ลึก) ชนิดและประเภทของหินอุ้มน้ำโดยสังเขป และขอบเขตของพื้นที่ศึกษาแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ หรือชนิดของขอบเขต (Boundary Conditions)

สภาพอุทกธรณีวิทยาของ อ.คูทอง ดังแสดงในรูปที่ 3-22 บริเวณทิศตะวันตกเป็นภูเขาจึงกำหนดให้เป็นขอบเขตที่น้ำไม่ไหลผ่าน (No Flow Boundary)

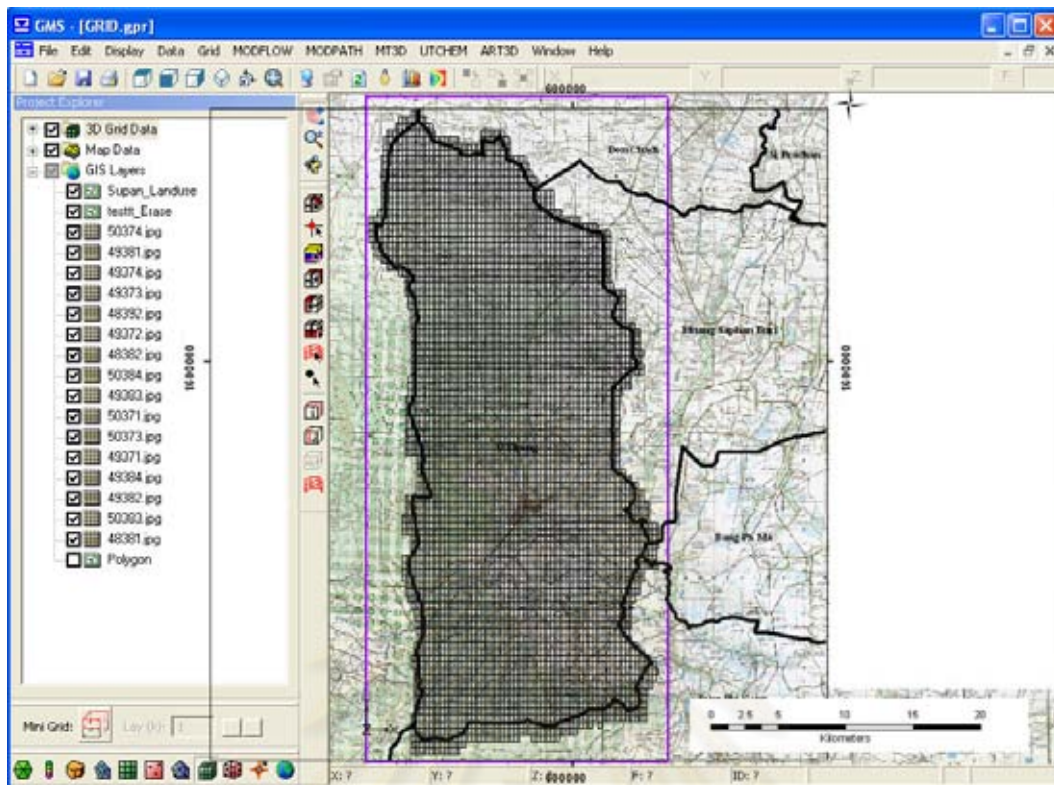
3.2.2.2 การสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน

จากแบบจำลองเชิงมโนทัศน์เพื่อพิจารณาการภาพของชั้นน้ำใต้ดินรวมไปถึงการออกแบบขอบเขตของชั้นน้ำใต้ดินแล้วจึงนำแบบจำลองเชิงมโนทัศน์มาพิจารณาประกอบการสร้างแบบจำลองของการไหลของน้ำใต้ดินทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

3.2.2.2.1 การออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อทำการรวบรวมข้อมูลสภาพทั่วไปของพื้นที่ศึกษาและลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองสภาพน้ำใต้ดินได้ครบถ้วนแล้ว จึงนำข้อมูลที่ได้มาประกอบสร้างเป็นแบบจำลอง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สอดคล้องกับสภาพน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษามากที่สุด โดยพบว่าลักษณะของชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 (Layer 1) ประกอบด้วยหินให้น้ำชนิด Permian Carbonate Aquifer (Pc), Colluvial Deposits Aquifer (Qcl), clay or sandy clay, sand and gravel ส่วนชั้นที่ 2 (Layer 2) ประกอบด้วยหินให้น้ำชนิด Permian Carbonate Aquifer (Pc) ในส่วนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ทำการออกแบบด้วยวิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference) ที่มีหน่วยย่อยในการคำนวณเชิงพื้นที่นั้นอยู่ในรูปของโครงสร้างที่ต่อกันด้วยรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 50 x 50 เมตร ซึ่งเรียกทรงสี่เหลี่ยมนี้ว่า 1 กริดเซลล์ ตามรูปที่ 3-23



รูปที่ 3-22 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา อำเภออุทุมพรพิสัย จังหวัดสุพรรณบุรี (สำนักประเมินศักยภาพและคุณภาพน้ำบาดาล 2550)



รูปที่ 3-23 บริเวณ อ.คูทอง จ.สุพรรณบุรี การกำหนดขนาดกริดในแบบจำลอง MODFLOW และ MT3D

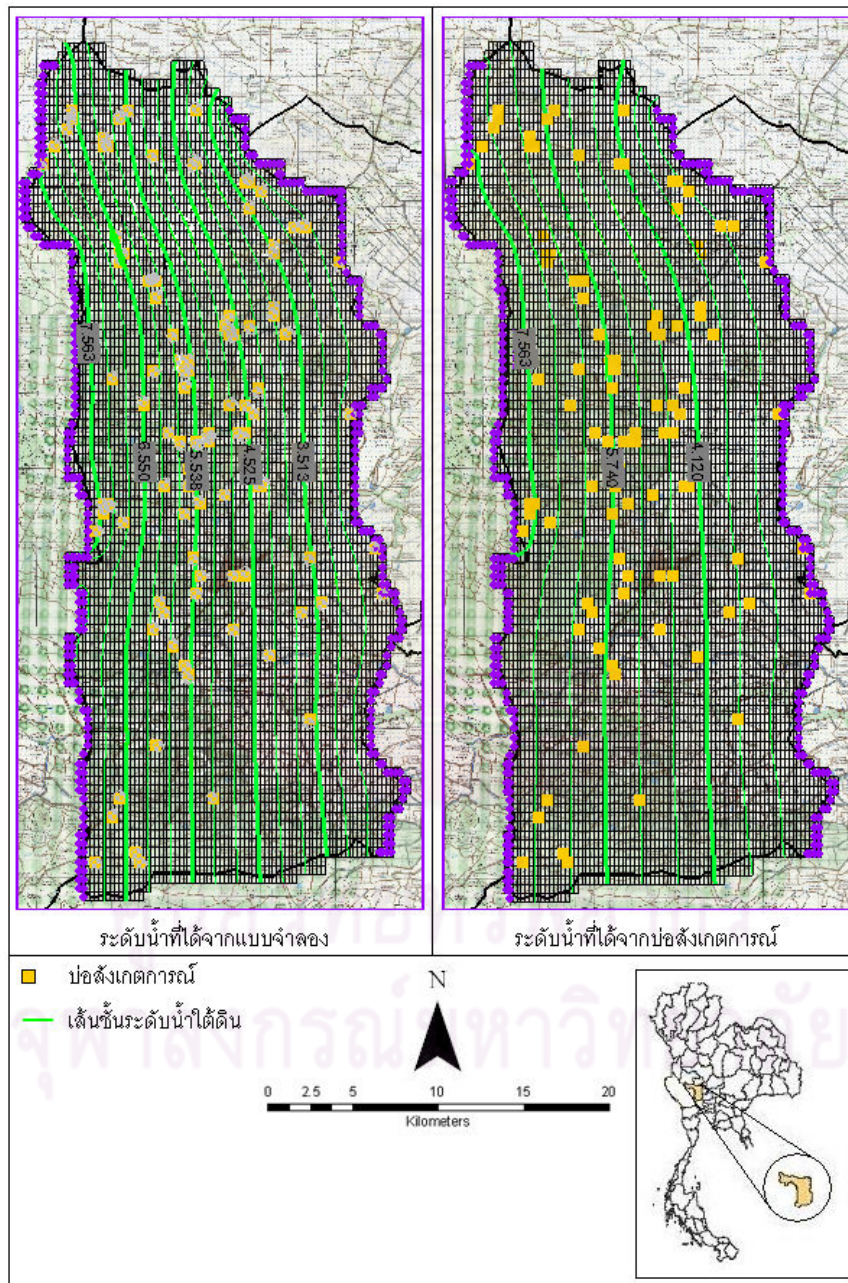
3.2.2.2.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการพัฒนาแบบจำลอง

1. ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Transmissivity) เป็นพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ที่มีนัยสำคัญต่อการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งได้มาจากการรวบรวมข้อมูลการสูบทดสอบที่มีในพื้นที่ศึกษาแล้วนำมาประมวลผลสำหรับการศึกษาคั้งนี้ได้ใช้วิธี Cooper-Jacob และ Theis-Recovery หาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจากการสูบทดสอบ จากนั้นจึงวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ จากการศึกษาศาภาพทางอุทกธรณีวิทยาที่ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของชั้นน้ำใต้ดินใน อ.คูทอง จำนวน 8 บ่อ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอยู่ระหว่าง 14.51 - 50.3 ตารางเมตรต่อวัน โดยค่าพารามิเตอร์จะถูกปรับเพื่อให้การไหลสอดคล้องกับสภาพการไหลในพื้นที่

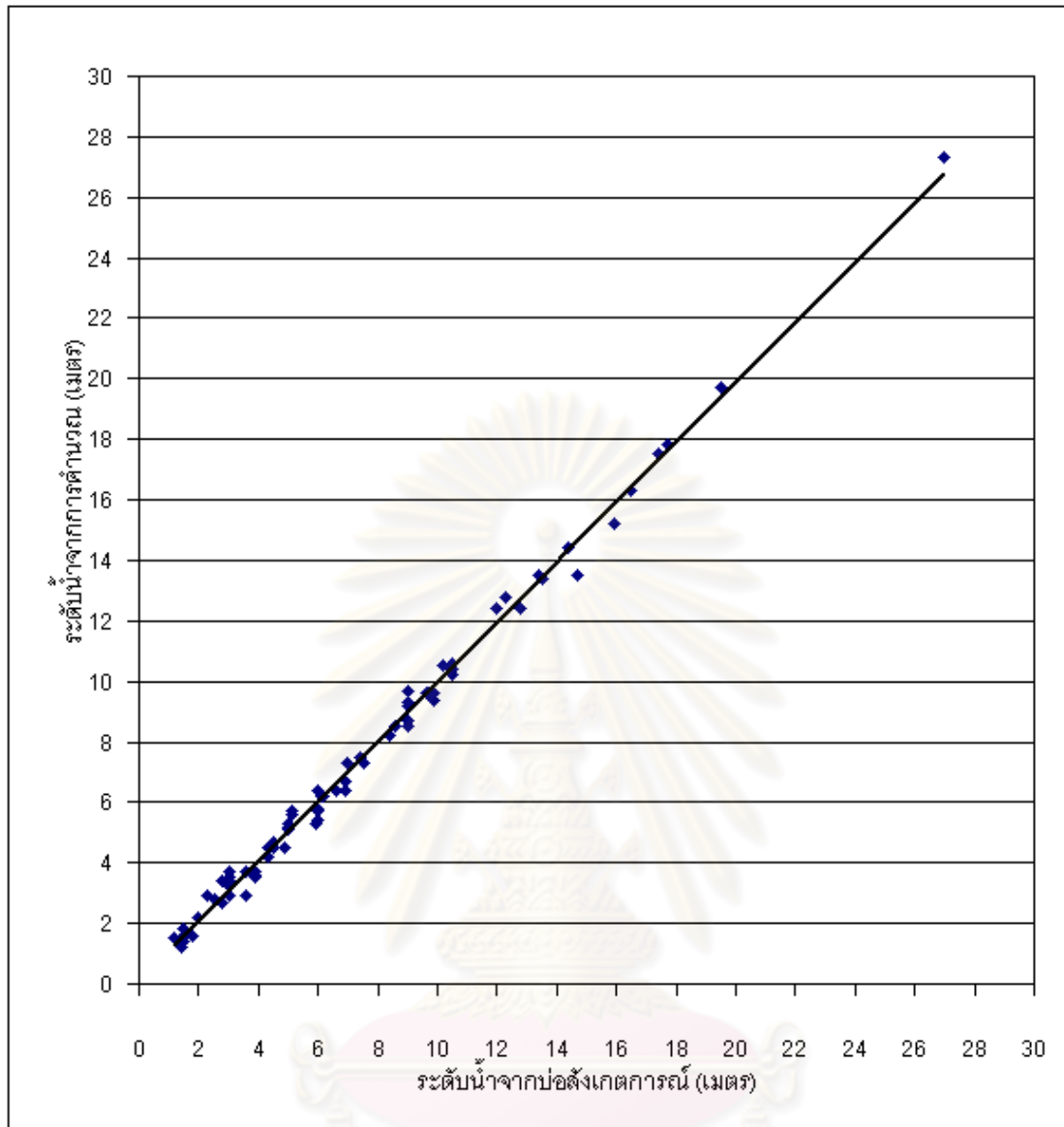
2. ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage Coefficient) คือปริมาณของน้ำที่ชั้นน้ำปริมาตรหนึ่งหน่วยกักเก็บเอาไว้หรือยอมให้ไหลออกมาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานเฉลี่ยหนึ่งหน่วย

3.2.2.2.3 อัตราการเติมน้ำ แหล่งน้ำหลักที่เติมน้ำเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้มาจากการเติมน้ำจากผิวดินหรือการเติมน้ำจากปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่ผ่านชั้นดินชั้นบนลงไปสู่ชั้นน้ำใต้ดิน โดยอัตราการเติมน้ำมีค่า 1,059.9 มิลลิเมตรต่อปี (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2550)

3.2.2.2.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองการไหล การเปรียบเทียบแบบจำลองใช้ค่าระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ในพื้นที่แบบจำลอง การศึกษานี้ได้จำลองระดับน้ำใต้ดินของเดือนมีนาคม 2552 ทั้งสิ้น 81 บ่อ ดังแสดงในรูปที่ 3-24 ผลการเปรียบเทียบได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination (R Square)) เท่ากับ 0.977 ดังแสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าสังเกตการณ์กับค่าที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองในรูปที่ 3-25



รูปที่ 3-24 แสดงการเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองและระดับน้ำที่ได้จากบ่อสังเกตการณ์



รูปที่ 3-25 เปรียบเทียบระดับน้ำจากการคำนวณในแบบจำลองคณิตศาสตร์กับระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์เดือน มีนาคม 2552

3.2.2.3 การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์การเคลื่อนที่ของไนเตรท

การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเชิงมโนทัศน์เป็นการนำสภาพชั้นน้ำใต้ดินในสภาพความเป็นจริง ลักษณะคุณสมบัติของสารปนเปื้อนประเภทไนเตรท มาสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถคำนวณลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อนได้

3.2.2.3.1 การออกแบบการจำลองแต่ละช่วงระยะเวลาการคำนวณ

แบบจำลองการแพร่กระจายในชั้นน้ำใต้ดินเป็นแบบจำลองในลักษณะ 2 มิติ ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนต์ดิฟเฟอเรน (Finite Difference) โดยการคำนวณมีลักษณะเป็นกริด (Grid)

3.2.2.3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองอาศัยข้อมูลจากการสำรวจทางอุทกธรณีวิทยาเรื่องการตัดแนวขวาง จากข้อมูลพบว่าพื้นที่ศึกษาประกอบด้วยชั้นหินให้น้ำแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ชั้นที่ 1 (Layer 1) ประกอบด้วยหินให้น้ำชนิด Permian Carbonate Aquifer (Pc), Colluvial Deposits Aquifer (Qcl), clay or sandy clay, sand and gravel และชั้นที่ 2 (Layer 2) ประกอบด้วยหินให้น้ำชนิด Permian Carbonate Aquifer (Pc)

3.2.2.3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการพัฒนาแบบจำลอง ค่าพารามิเตอร์ในการพัฒนาแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน ได้แก่ค่า Hydraulic conductivity, Porosity, Density, Dispersion ระดับน้ำใต้ดิน ค่าประมาณมวลสารปนเปื้อนและตำแหน่งบ่อบาดาล ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการปนเปื้อนในพื้นที่ศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองการปนเปื้อนของไนเตรทในพื้นที่ศึกษา

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
Porosity	0.3
Density	2.26 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
Retardation factor	1.077
ระดับน้ำใต้ดิน	ขอบเขตบน 1.2 เมตร ขอบเขตล่าง 27.3 เมตร
Elevation	ชั้นที่ 1 ตั้งแต่มวล 50 เมตร เหนือผิวดิน จนถึงผิวดิน (0 เมตร) ชั้นที่ 2 ตั้งแต่มวล 0 เมตร จนถึงใต้ดินที่ระดับ 50 เมตร

3.2.2.3.4 การปรับเทียบแบบจำลองการแพร่กระจายของมลสาร การจำลองการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน ได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์จากผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าความเข้มข้นของไนเตรทที่วัดได้ในพื้นที่จริง

การจำลองสภาพพื้นที่ปนเปื้อนในการศึกษาครั้งนี้ได้ปรับแก้ค่าพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การแพร่ โดยพิจารณาผลการคำนวณเทียบกับค่าความเข้มข้นของไนเตรทจากพื้นที่จริงในช่วงเดือนมิถุนายน 2550 และเดือนกุมภาพันธ์ 2551

บทที่ 4

ผลการศึกษาแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองคณิตศาสตร์

ผลการศึกษาในบทนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1.ผลการศึกษาจากแบบจำลองทางกายภาพ และ 2.ผลการศึกษาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาจากแบบจำลองทางกายภาพ

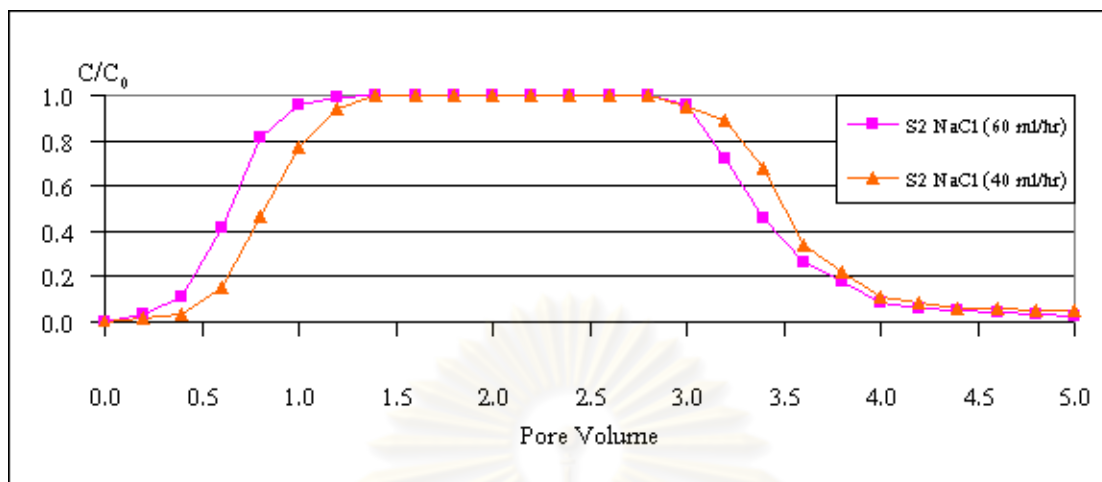
ผลการศึกษาจากการทดลองโดยแบบจำลองทางกายภาพ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1. ผลการศึกษาพฤติกรรมของเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ 2. ผลการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และ 3. ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการชะละลายของไนเตรทจากชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินแบบอิ่มตัว

4.1.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมของเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

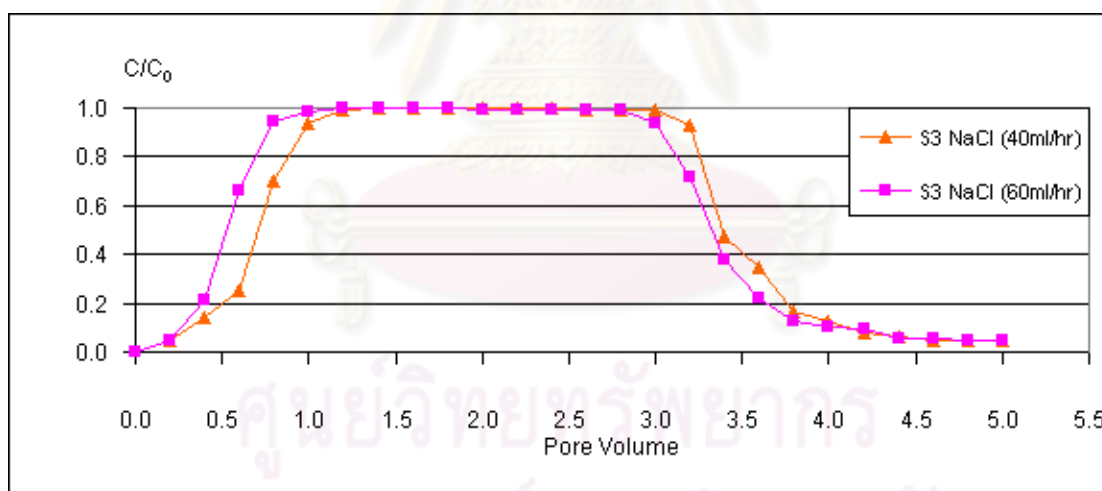
ผลการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำในตัวอย่างดิน S2, S3 และ S8 แสดงในรูปของ Breakthrough Curves (BTC) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรช่องว่างในดินที่ใช้ในการทดลอง (แกน X) และค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ (C/C_0) ของสาร รูปที่ 4-1 ถึง รูปที่ 4-5 แสดง Breakthrough Curves ของสาร เทอร์เซอร์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง S2, S3 และ S8 ที่อัตราการไหล 40 และ 60 ml/hr

ตารางที่ 4-1 ความเข้มข้นเฉลี่ยของเทอร์เซอร์ก่อนเข้าคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองแต่ละชุดการทดลอง

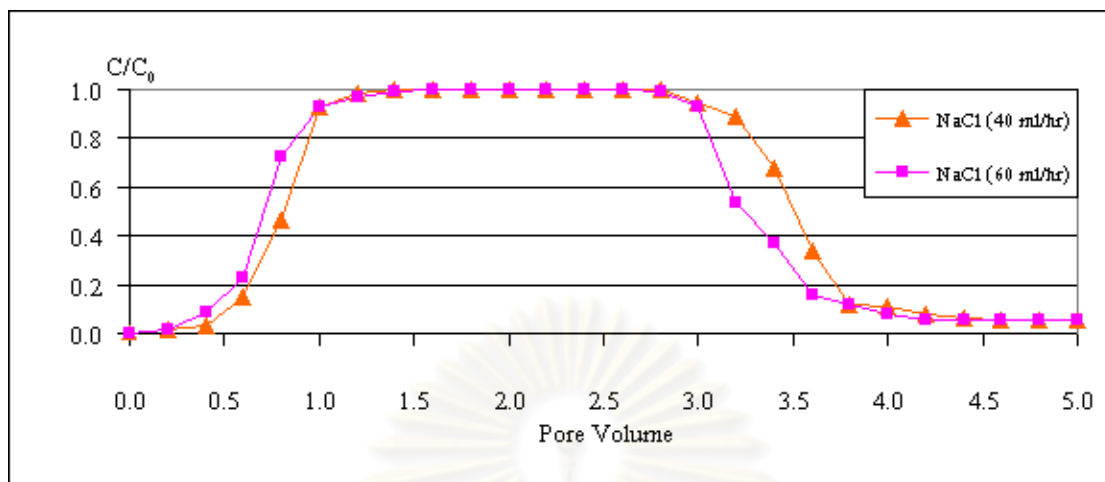
อัตราการไหล	ดินชุดที่	ตัวอย่างดิน	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเทอร์เซอร์ในชุดการทดลอง (C_0)
40 ml/hr	1	S2	9.81 มิลลิกรัมต่อลิตร
	2	S3	9.81 มิลลิกรัมต่อลิตร
	3	S8	9.81 มิลลิกรัมต่อลิตร
60 ml/hr	1	S2	9.81 มิลลิกรัมต่อลิตร
	2	S3	9.81 มิลลิกรัมต่อลิตร
	3	S8	9.81 มิลลิกรัมต่อลิตร



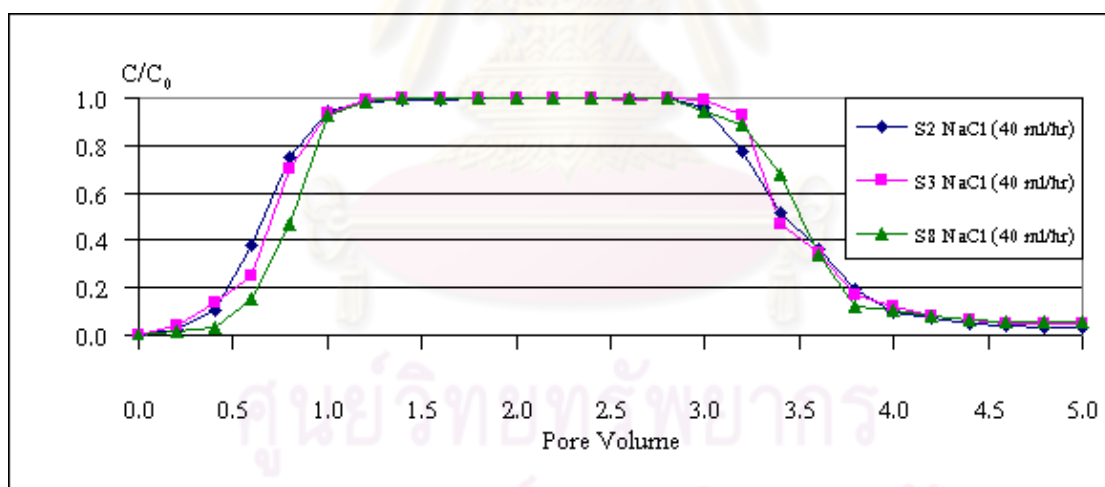
รูปที่ 4-1 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1 (S2) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



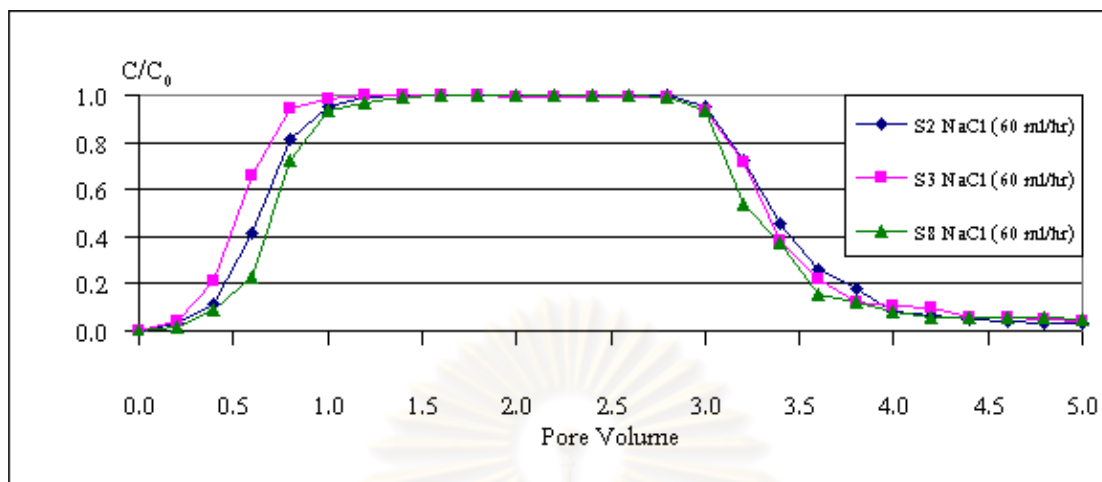
รูปที่ 4-2 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 2 (S3) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-3 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 3 (S8) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-4 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-5 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4-1 แสดงความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลอง จากผลการทดลองการเคลื่อนที่ของเทอร์เซอร์กับตัวอย่างชุดดินทั้งสามชุดดินที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงพบว่าค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่วิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำที่เก็บรวบรวมจากคอลัมน์ต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูงสุด 9.81 มิลลิกรัมต่อลิตร (C_0) จากนั้นความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนลดลงจนกระทั่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลให้ลักษณะของ Breakthrough Curve ของคลอไรด์ไอออนระหว่างการดูดซับของคลอไรด์ไอออนมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำแบบไม่สมมาตรโดยลักษณะกราฟเบี่ยงไปด้านซ้ายมือ

เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุน (Mean Residence Time) สามารถคำนวณได้จาก Breakthrough Curve ของคลอไรด์ไอออนดังแสดงในตารางที่ 4-2 การคำนวณหาค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนของคลอไรด์ไอออนได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ข

เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทอร์เซอร์จากการทดลอง เมื่ออัตราการไหลคงที่ ดินทดลองชุดที่ 2 (S3) ซึ่งมีความหยาบสุด ให้ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทอร์เซอร์น้อยที่สุด คือ 54.50 นาที ในทำนองเดียวกันดินทดลองชุดที่ 3 (S8) ซึ่งมีความละเอียดสุด ให้ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทอร์เซอร์มากที่สุดคือ 66.82 นาที ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่อัตราการไหลสูง น้ำและคลอไรด์ไอออนสามารถ

เดินทางได้เร็วกว่าส่งผลให้เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทอร์เซอร์ลดลง 31.8%, 37.7% และ 37.1% ในดินทดลอง S2, S3 และ S8 ตามลำดับ

การทดลองยังได้ศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนในดินทดลองชุดที่ 1-3 ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4-1 ถึง 4-5 พบว่าสำหรับดินตัวอย่างทดลองชนิดเดียวกันเมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำในระบบทดลองสูงขึ้นจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้ตรวจพบคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างน้ำออกจากคอลัมน์ได้เร็วขึ้น สังเกตได้จาก Breakthrough Curve ในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนด้านหน้า ของคลอไรด์ไอออนภายใต้สภาวะการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงจะเดินทางมาถึงก่อนเส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนด้านหน้าของคลอไรด์ไอออนภายใต้สภาวะการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง สรุปได้ว่าอัตราการไหลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนในตัวกลางรูพรุนที่ทดลอง โดยที่อัตราการไหลสูงมีผลให้คลอไรด์ไอออนเดินทางในตัวกลางรูพรุนได้เร็วขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อลักษณะรูปร่างของเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับของเทอร์เซอร์ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาในอดีต (เกรียงศักดิ์ 2007) เนื่องจากคลอไรด์ไอออนเป็นสารเทอร์เซอร์ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยามีอัตราการเคลื่อนที่เท่ากับอัตราการไหลของโมเลกุลน้ำในตัวกลางรูพรุน

ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนของคลอไรด์ไอออนที่คำนวณได้จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองการพาในระดับห้องปฏิบัติการ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4-2 จำแนกตามประเภทดินทดลองชุดที่ 1-3 และอัตราการไหลของน้ำ จะถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นค่าอ้างอิงเปรียบเทียบกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4-2 เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทอร์เซอร์ผ่านตัวอย่างดินทดลอง

อัตราการไหลของน้ำ	ดินชุดที่ 1 (S2)	ดินชุดที่ 2 (S3)	ดินชุดที่ 3 (S8)
40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	63.98 นาที	54.50 นาที	66.82 นาที
60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	43.65 นาที	33.93 นาที	42.03 นาที

4.1.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

ผลการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทผ่านดินทดลองชุดที่ 1-3 ภายใต้สภาวะการไหลแบบอิ่มตัวด้วยน้ำ แสดงในรูปของ Breakthrough Curve ของไนเตรทในรูปที่ 4-12 ถึง 4-16 รูป Breakthrough Curve ของไนเตรทแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรท (ความเข้มข้นของไนเตรทในตัวอย่างน้ำที่เก็บรวบรวมจากคอลัมน์ต่อความเข้มข้นของ

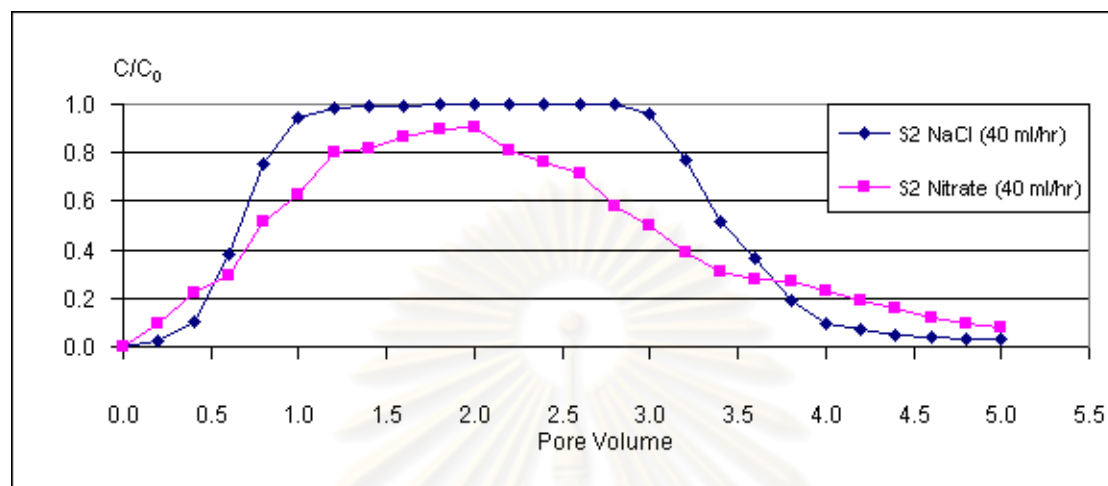
ไนเตรทเริ่มต้น) (แกน Y) กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง (แกน X) การแสดงผลการศึกษาในรูปแบบของ Breakthrough Curve มีข้อดีคือสามารถนำผลการทดลองที่ได้จากแต่ละคอลัมน์ไปเปรียบเทียบกันได้โดยตรง แม้ว่าปริมาณไนเตรทเริ่มต้นในแต่ละการทดลองจะแตกต่างกันออกไปเล็กน้อยก็ตาม

จาก Breakthrough Curve ของไนเตรทจากการทดลองโดยใช้ดินชุดที่ 1 ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (รูปที่ 4-6) พบว่าความเข้มข้นของไนเตรทได้ใน Effluent มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทมีค่าสูงสุดที่ 0.9 แล้วจึงค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลให้ลักษณะของเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำแบบไม่สมมาตรโดยเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทมีลักษณะเบ้ซ้าย นอกจากนี้ความชันของ Breakthrough Curve ของไนเตรทในช่วงขาขึ้น (ก่อนถึงค่าสูงสุด) มีค่ามากกว่าในช่วงขาลง (หลังจากค่าสูงสุด) อย่างชัดเจน ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเทลลิงเอฟเฟค (Tailing Effects) กล่าวคือพฤติกรรมที่เกิดจากกระบวนการ Back Diffusion ของสารปนเปื้อนที่ Pore Scale โดยเฉพาะอนุภาคของดินเหนียว (Clay) โดยอาศัยผลต่างของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนออกจากตัวกลางรูพรุนที่มีขนาดเล็กมาก (เกรียงศักดิ์ 2007)

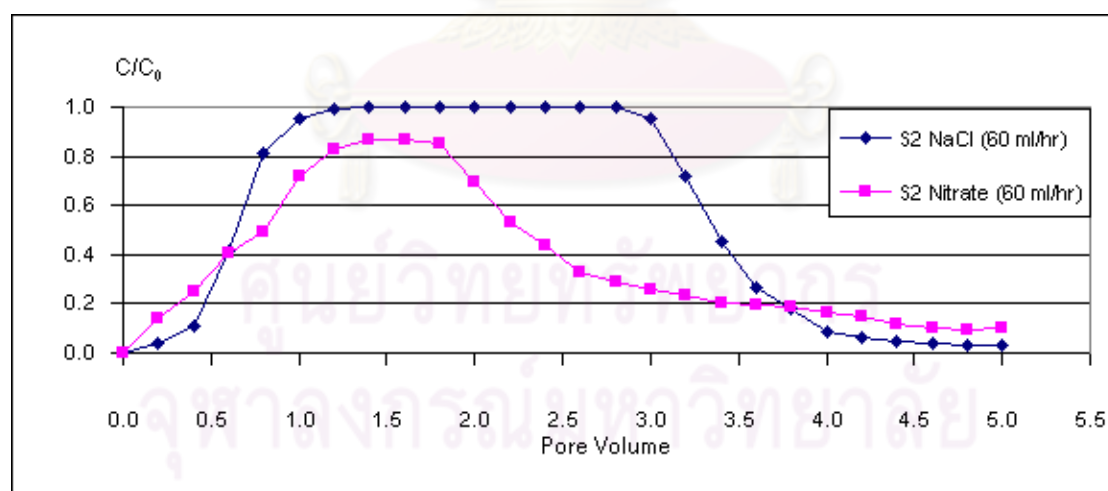
เมื่อดำเนินการทดลองในลักษณะเดียวกัน โดยใช้ดินทดลองชุดต่าง ๆ ตามที่ได้จำแนกประเภทไว้เป็นดินทดลองชุดที่ 1-3 พบว่าลักษณะ Breakthrough Curve ของไนเตรทยังคงมีรูปแบบคล้ายคลึงกัน กล่าวคือมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำแบบไม่สมมาตร ค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์สูงสุดของไนเตรทที่ตรวจพบในตัวอย่างไม่ต่ำกว่า 1.0 อย่างชัดเจน ความชันขาขึ้นของ Breakthrough Curve ของไนเตรทมีค่าสูงกว่าความชันขาลงของ Breakthrough Curve สัมพัทธ์ของไนเตรทและเทลลิงเอฟเฟคเกิดในช่วงท้ายของการทดลอง

เมื่อนำเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของเทอร์เซอร์ที่ได้จากการศึกษามาเปรียบเทียบกับเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทดังแสดงในรูปที่ 4-6 ถึง 4-11 ตรวจพบความเข้มข้นของไนเตรทเดินทางออกมาก่อนความเข้มข้นของเทอร์เซอร์ในช่วงแรกเนื่องจากไนเตรทมีความเข้มข้นมากกว่าทำให้มีการแพร่ออกมาได้เร็วกว่าเทอร์เซอร์ นอกจากนี้พบว่าพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทที่ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือแม้ว่ารูปร่างของเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทจะคล้ายรูประฆังคว่ำที่ไม่สมมาตรแต่เทลลิงเอฟเฟคนั้นจะพบได้เฉพาะในกรณีของไนเตรท สำหรับคลอไรด์ไอออนซึ่งเป็นสารเทอร์เซอร์ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา ไม่สังเกตพบเทลลิงเอฟเฟคอย่างชัดเจนนัก ค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์สูงสุดของคลอไรด์ไอออนที่ตรวจวัดได้ในน้ำตัวอย่างเมื่อดำเนินการทดลองกับดินทดลองชนิดที่ 1-3 มีค่าเท่ากับ 1 ในขณะที่ค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทในดินชนิดที่ 1-3 มีค่าต่ำกว่า 1 เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทและเวลาเฉลี่ยในการ

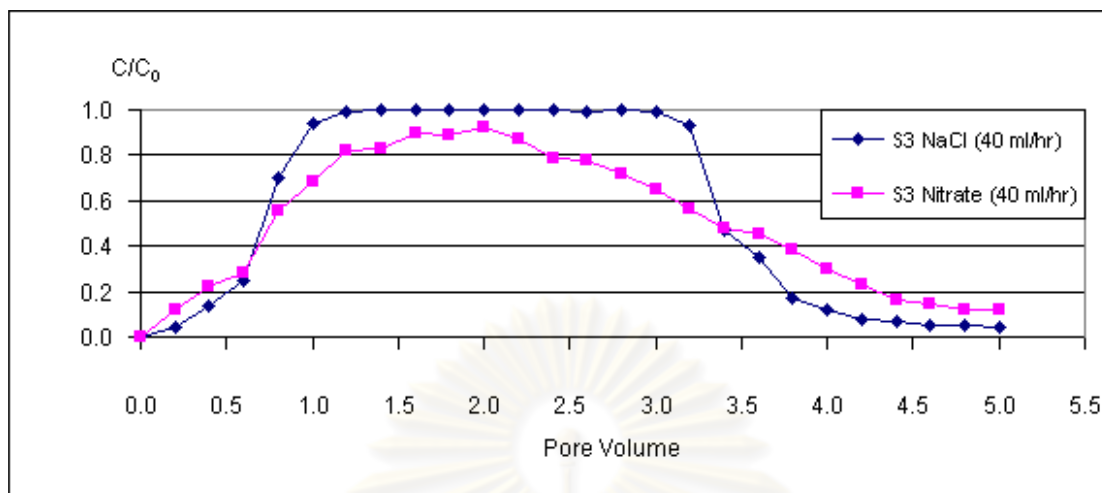
เส้นทางของสารปนเปื้อนทั้งสามชนิดพบว่าแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ด้านหน้าของคลอไรด์ไอออนเดินทางมาถึงก่อนแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ด้านหน้าของไนเตรท



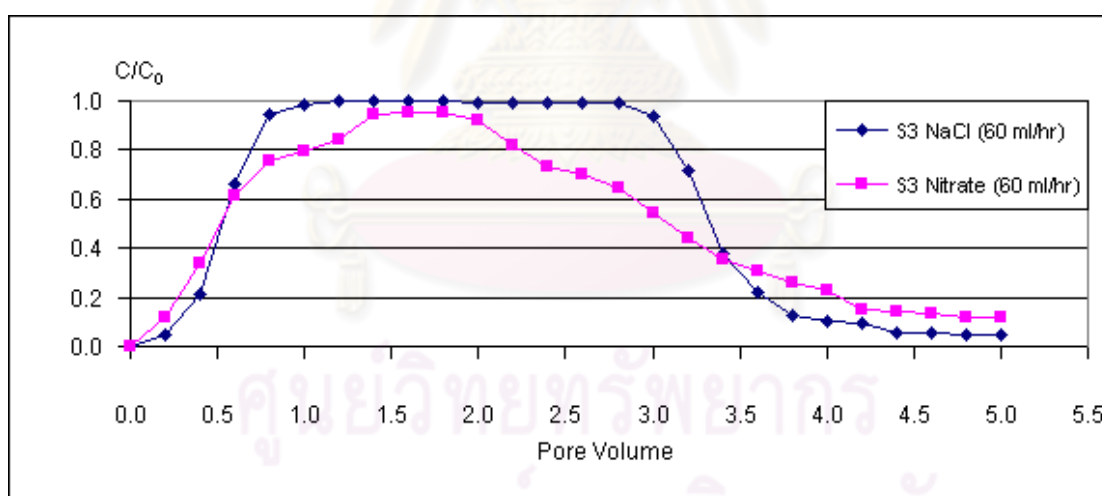
รูปที่ 4-6 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์กับไนเตรทในดินทดลองชุดที่ 1 (S2) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



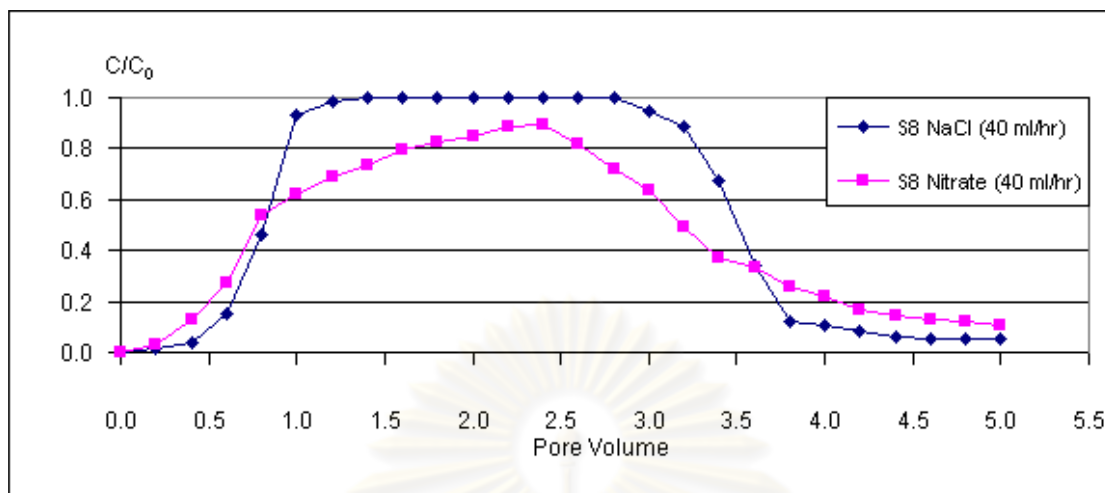
รูปที่ 4-7 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์กับไนเตรทในดินทดลองชุดที่ 1 (S2) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



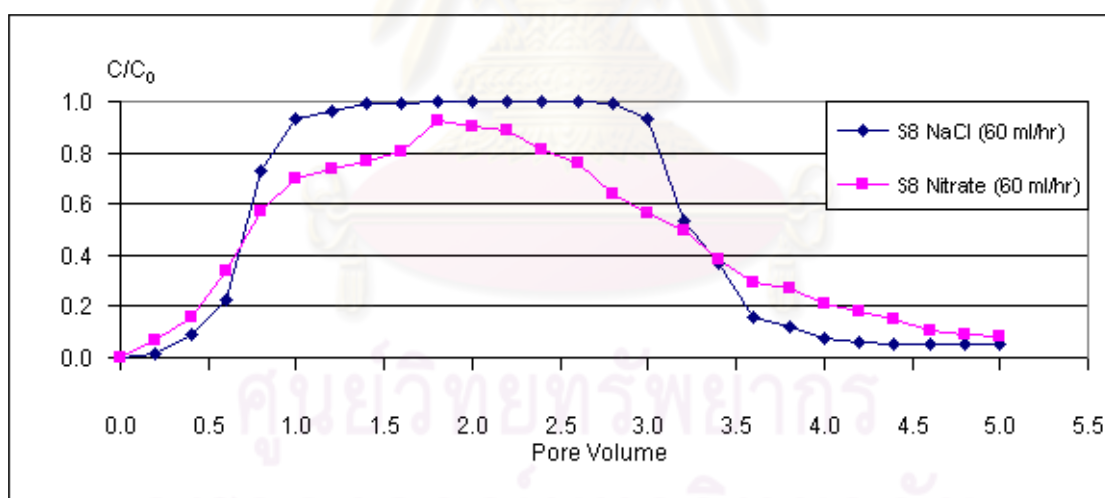
รูปที่ 4-8 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์กับไนเตรทในดินทดลองชุดที่ 2 (S3) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-9 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทอร์เซอร์กับไนเตรทในดินทดลองชุดที่ 2 (S3) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-10 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์กับไนเตรทในดินทดลองชุดที่ 3 (S8) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

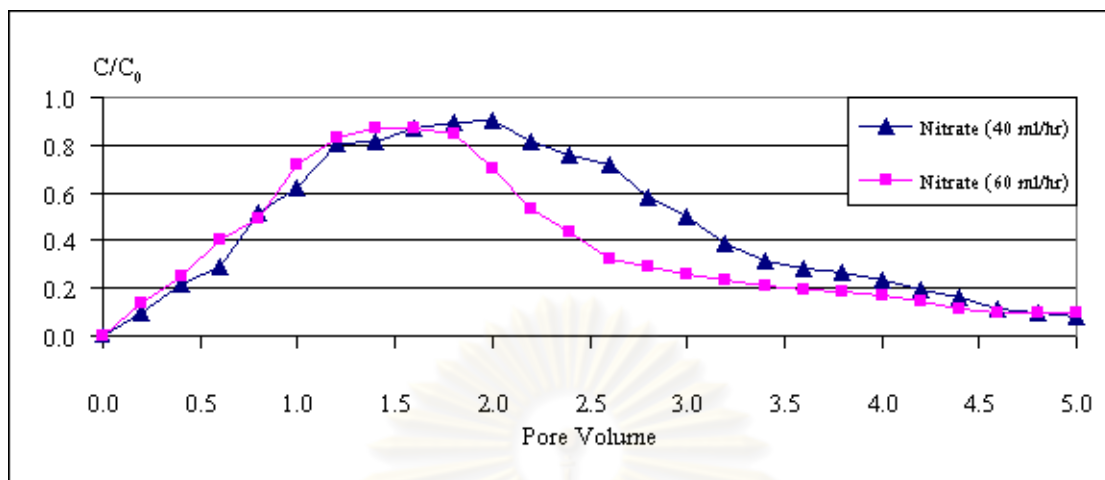


รูปที่ 4-11 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารเทรเซอร์กับไนเตรทในดินทดลองชุดที่ 3 (S8) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

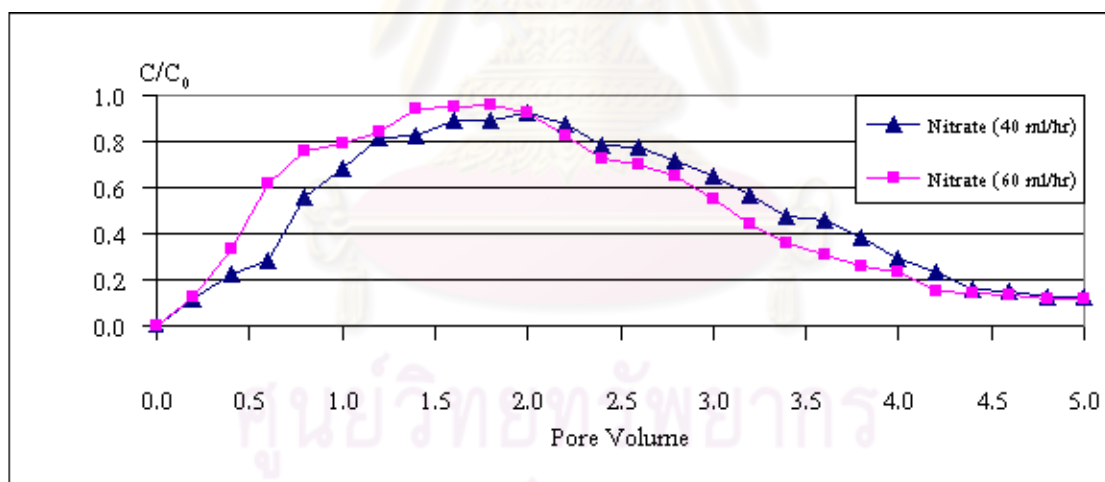
จากลักษณะการเคลื่อนที่ของไนเตรทในรูปของ Breakthrough Curve สามารถนำมาคำนวณเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการเดินทางของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนได้ ตัวอย่างการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนในดินทดลองชุดที่ 1-3 สรุปไว้ในตารางที่ 4-3 ข้อแตกต่างที่สังเกตได้อย่างชัดเจนคือ เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทในดินทดลองชุดที่ 1-3 ภายใต้สภาวะการไหลคงที่นั้น มีค่าไม่คงที่ โดยที่เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทมีค่าต่ำสุดสำหรับชุดดินทดลองชนิดที่ 2 (S3) ซึ่งเป็นตัวอย่างดินที่มีขนาดของเม็ดดินเฉลี่ยใหญ่ที่สุด รองลงมาคือดินทดลองชุดที่ 1 (S2) และดินทดลองชุดที่ 2 (S8) ตามลำดับ สรุปได้ว่าขนาดตัวกลางรูพรุนชนิดต่าง ๆ รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดดินที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรท และมีผลต่อรูปร่างของ Breakthrough Curve ของไนเตรทด้วย

นอกจากนี้ในการศึกษานี้ยังได้ดำเนินการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทในตัวกลางรูพรุนชุดที่ 1-3 ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4-12 ถึง 4-16 พบว่าเมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ตัวกลางรูพรุนชนิดเดียวกันและปรับอัตราการไหลของน้ำในระบบทดลองให้สูงขึ้นจากอัตราการไหล 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้มีการตรวจพบไนเตรทในตัวอย่างน้ำที่ออกจากคอลัมน์ได้เร็วขึ้น โดยสังเกตได้จาก Breakthrough Curve ของไนเตรทที่ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเดินทางมาถึงท้ายคอลัมน์ก่อน เมื่อทำการคำนวณเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทพบว่าการปรับอัตราการไหลให้สูงขึ้นส่งผลให้เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทลดลงเนื่องจากที่อัตราการไหลสูงเมื่อระยะทางที่น้ำไหลผ่านดินในคอลัมน์คงที่ เมื่ออัตราการไหลสูง ทำให้ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านมีค่ามากส่งผลให้เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทลดลง 32.4%, 37.9% และ 37.1% ในดินทดลอง S2, S3 และ S8 ตามลำดับ ดังแสดงเปรียบเทียบในตาราง 4-3 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทในตัวกลางรูพรุนที่ดำเนินการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ

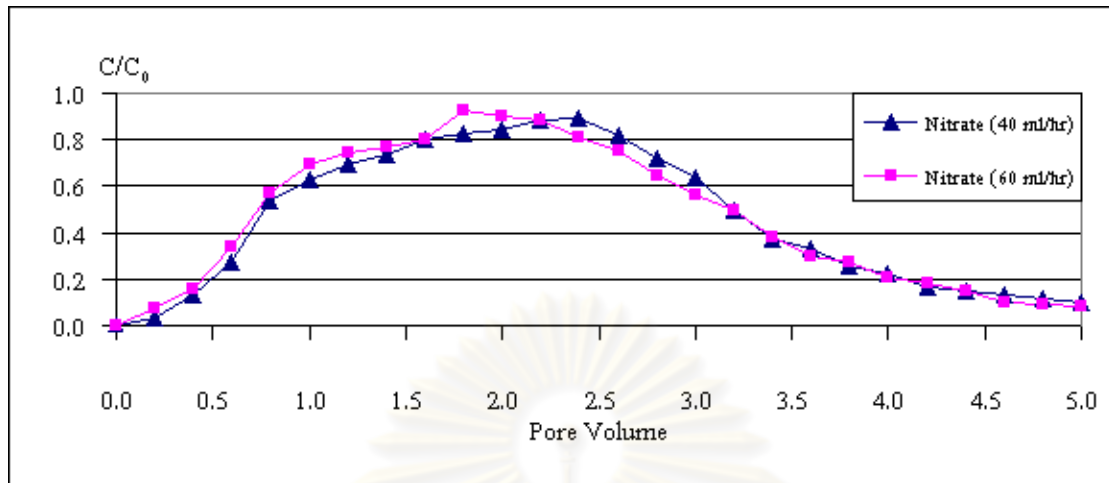
ลักษณะการเคลื่อนที่ของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 4-15 และ 4-16 ดินทดลองชุดที่ 2 (S3) ซึ่งมีความหยาบสุด พบว่าที่อัตราการไหลต่ำ (40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) ส่งผลให้ไนเตรทเคลื่อนที่ในตัวอย่างน้ำออกจากคอลัมน์ได้เร็วกว่าดินทดลองชุดที่ 3 (S8) ซึ่งมีความละเอียดกว่า สังเกตจาก Breakthrough Curve ในระหว่างการดูดซับของสารปนเปื้อนด้านหน้าของไนเตรท ให้ค่า Pore Volume เท่ากับ 1.6, 1.8 และ 2.4 ในดินทดลอง S3, S2 และ S8 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลสูง (60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) ไนเตรทเคลื่อนที่ในตัวอย่างน้ำออกจากคอลัมน์ได้เร็วกว่าอัตราการไหลต่ำ ให้ค่า Pore Volume เท่ากับ 1.4, 1.7 และ 2.3 ในดินทดลอง S3, S2 และ S8 ตามลำดับ สรุปได้ว่าขนาดของเม็ดดินมีผลต่อการเคลื่อนที่ของไนเตรทในตัวกลางรูพรุนที่ทดลอง



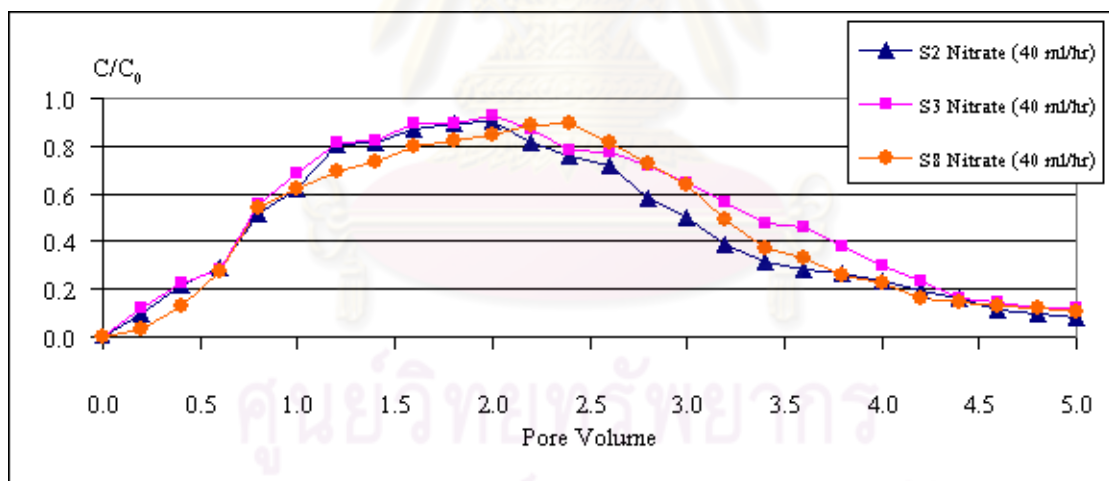
รูปที่ 4-12 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทกับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1 (S2) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



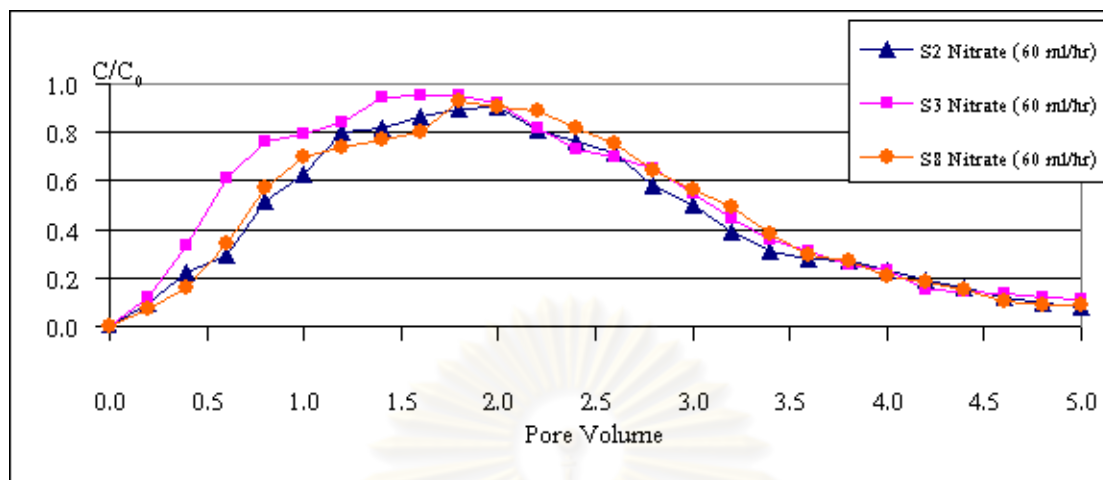
รูปที่ 4-13 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทกับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 2 (S3) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-14 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทกับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 3 (S8) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-15 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทกับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-16 กราฟความเข้มข้นสัมพัทธ์ของไนเตรทกับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4-3 ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางและความเข้มข้นเฉลี่ยก่อนเข้าคอลัมน์ของไนเตรทในชุดการทดลอง

ดินทดลอง	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารในชุดการทดลอง (C_0) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลาเฉลี่ยใน การเดินทาง ผ่านตัวกลางรูพรุน (นาที)
ชุดที่ 1 (S2)	40	400	69.22
	60	400	46.77
ชุดที่ 2 (S3)	40	400	60.33
	60	400	37.39
ชุดที่ 3 (S8)	40	400	70.14
	60	400	44.05

ตารางที่ 4-4 ค่าตัวประกอบความหน่วงของดินในแต่ละชุดการทดลอง

ดินทดลอง	อัตราการไหล (ml/hr)	ค่าตัวประกอบความหน่วง
ชุดที่ 1 (S2)	40	1.082
	60	1.072
ชุดที่ 2 (S3)	40	1.110
	60	1.100
ชุดที่ 3 (S8)	40	1.050
	60	1.048

เมื่อนำเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรท มาคำนวณหาตัวประกอบความหน่วง (Retardation Factor) ซึ่งนิยามว่าอัตราส่วนระหว่างค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทกับค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทรเซอร์ ค่าตัวประกอบความหน่วงคือค่าที่บอกถึงการหน่วงการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนอันเป็นผลจากกระบวนการต่าง ๆ ทั้งกายภาพ เคมีและชีวะ อาทิเช่น กระบวนการดูดซับติดผิว (Sorption) ระหว่างโมเลกุลของสารปนเปื้อนกับตัวกลางรูพรุน ค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทรเซอร์และไนเตรท เมื่อพิจารณาดินทดลองชุดที่ 2 (S3) ซึ่งเป็นเม็ดดินที่มีความหยาบสุดมีค่าน้อยเนื่องจากใช้เวลาในการดูดซับน้อย ส่วนดินทดลองชุดที่ 1 (S2) และดินทดลองชุดที่ 3 (S8) มีค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทรเซอร์ และไนเตรทที่ใกล้เคียงกันทำให้ค่าตัวประกอบความหน่วงของดินทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่าตัวประกอบความหน่วงของไนเตรทจากดินทดลองชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงมีค่า 1.082, 1.110 และ 1.050 ตามลำดับ และค่าตัวประกอบความหน่วงของไนเตรทจากดินทดลองชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงมีค่า 1.072, 1.100 และ 1.048 ตามลำดับ ซึ่งค่าตัวประกอบความหน่วงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักคือตัวกลางรูพรุนและอัตราการไหลของน้ำ ค่าตัวประกอบความหน่วงที่ได้จากการทดลองครั้งนี้มีค่าค่อนข้างต่ำสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (ค่าตัวประกอบความหน่วงของไนเตรทมีค่าระหว่าง 0.8-3.0 (Schepers and Raun 2008))

พิจารณาผลของอัตราการไหลของน้ำและค่าตัวประกอบความหน่วง ที่อัตราการไหลต่ำ เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทมีค่ามาก ได้ค่าตัวประกอบความหน่วงอยู่ในช่วง 1.05 – 1.11 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ไนเตรทเดินทางผ่านคอลัมน์ได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ค่าตัวประกอบความหน่วงของไนเตรทมีค่าลดลง อยู่ในช่วง 1.05 – 1.10

ตารางที่ 4-5 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรทที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์

ดินทดลอง ชุดที่	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Dispersivity) (เซนติเมตร)
1 (S2)	40	2.41
	60	2.79
2 (S3)	40	4.53
	60	4.94
3 (S8)	40	2.32
	60	2.57

สัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนที่คำนวณได้จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพแบบคอลัมน์ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4-5 จำแนกตามประเภทดินทดลองชุดที่ 1-3 และอัตราการไหลของน้ำผ่านคอลัมน์ สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการทดลองนี้จะนำไปเป็นค่าเริ่มต้นในแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D และให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่ามากที่สุดเพื่อให้กราฟจากแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองคณิตศาสตร์มีลักษณะใกล้เคียงกันมากที่สุด

จากผลการทดลองตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ดินทดลองตัวอย่างที่ 1 (S2) ดินทดลองตัวอย่างที่ 2 (S3) และดินทดลองตัวอย่างที่ 3 (S8) ซึ่งดินทั้ง 3 ชนิดเรียงลำดับความหยาบจากมากไปน้อยได้แก่ ดินทดลองตัวอย่างที่ 2 (S3) ดินทดลองตัวอย่างที่ 1 (S2) และดินทดลองตัวอย่างที่ 3 (S8) ตามลำดับ จากทฤษฎีของ C.W. Fetter (1999) กล่าวว่าเม็ดดินที่มีความหยาบมากจะมีค่า Dispersivity สูงด้วย จากสมการของ C.W. Fetter (1999) $\alpha_L = D_L / v$ เมื่อ $\alpha_L = \text{Dispersivity (L)}$, $D_L = \text{Hydrodynamic Dispersion Coefficient}$ และ $v = \text{ความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านตัวกลางรูพรุน}$ เมื่อมีของไหลไหลผ่านตัวกลางที่มีความหยาบมากจะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับเม็ดดิน (Mechanical Mixing) มาก ค่า Hydrodynamic Dispersion Coefficient จะมีค่ามาก ส่งผลให้ค่า Dispersivity มีค่าสูง ซึ่งจากผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎี เมื่อเม็ดดินมีความหยาบมาก ค่า Dispersivity จะมีค่ามากส่วนเม็ดดินที่มีขนาดความหยาบน้อย ค่า Dispersivity จะมีค่าน้อย

4.1.3 ผลการทดลองการวิเคราะห์พฤติกรรมการชะละลายของไนเตรทจากชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินแบบอิมิตัว

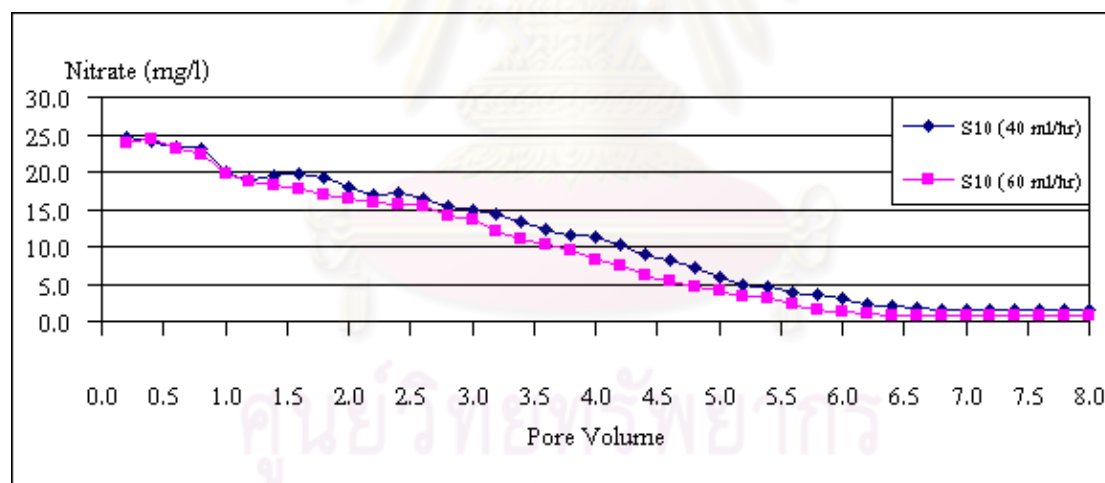
การวิเคราะห์พฤติกรรมการชะละลายของไนเตรทจากชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินแบบอิมิตัว โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพแบบคอลัมน์ โดยนำน้ำ Milli-Q มาชะละลายตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนไนเตรท ได้แก่ตัวอย่างดินทดลองชุดที่ 4 (S10) ดินทดลองชุดที่ 5 (S11) และดินทดลองชุดที่ 6 (S13) แบ่งดินตัวอย่างออกมาจำนวน 3 ส่วน กวนผสมโดยใช้ Magnetic Stirrer จากนั้นจึงวัดความเข้มข้นของไนเตรทในรูปของสารละลายเพื่อหาค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไนเตรท ค่าความเข้มข้นของไนเตรทที่วัดได้คือความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้นก่อนการทดลองหาพฤติกรรมการชะละลายของไนเตรท (Mass In) จากนั้นเริ่มการทดลองโดยบรรจุดินใส่ในคอลัมน์ ปล่อยน้ำ Milli-Q เข้าสู่คอลัมน์ดินด้วยอัตราการไหลต่ำ (40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) และอัตราการไหลสูง (60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) เพื่อชะตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนไนเตรท ดำเนินการทดลองเป็นเวลา 8 เท่าของปริมาตรช่องว่างในดิน เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการชะละลายในหลอดทดลอง เพื่อตรวจวัดวัดหาความเข้มข้นของไนเตรทด้วยเครื่องวัดความเข้มข้นไนเตรท Nitrate Ion Selective Electrode ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4-6 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนเตรทและปริมาตรช่องว่างของดินทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-17 ถึง 4-19

ตารางที่ 4-6 แสดงการชะล้างของไนเตรทจากการทดลองการชะละลายของไนเตรท

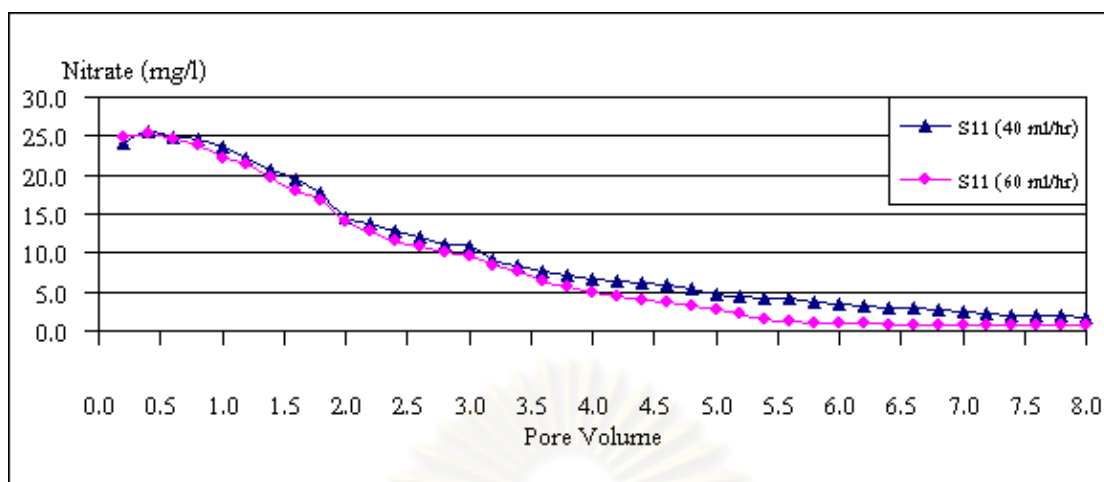
ตัวอย่างดิน	อัตราการไหล (ml/hr)	มวลไนเตรทเข้า (mg/g sand)	มวลไนเตรทออก (mg/g sand)	ผลต่างของมวล ขาเข้าและ ขาออก (mg/g sand)	% ไนเตรท ที่ถูกชะละลาย
ชุดที่ 4 (S10)	40	0.0446	0.03802	0.00658	85.25
	60	0.0446	0.03590	0.00870	80.49
ชุดที่ 5 (S11)	40	0.04667	0.03943	0.00724	84.48
	60	0.04667	0.03477	0.01190	74.50
ชุดที่ 6 (S13)	40	0.0714	0.05980	0.01160	83.75
	60	0.0714	0.05175	0.01965	72.48

ตารางที่ 4-7 แสดงปริมาณไนเตรทที่ตกค้างในดินจากการทดลองคอลัมน์

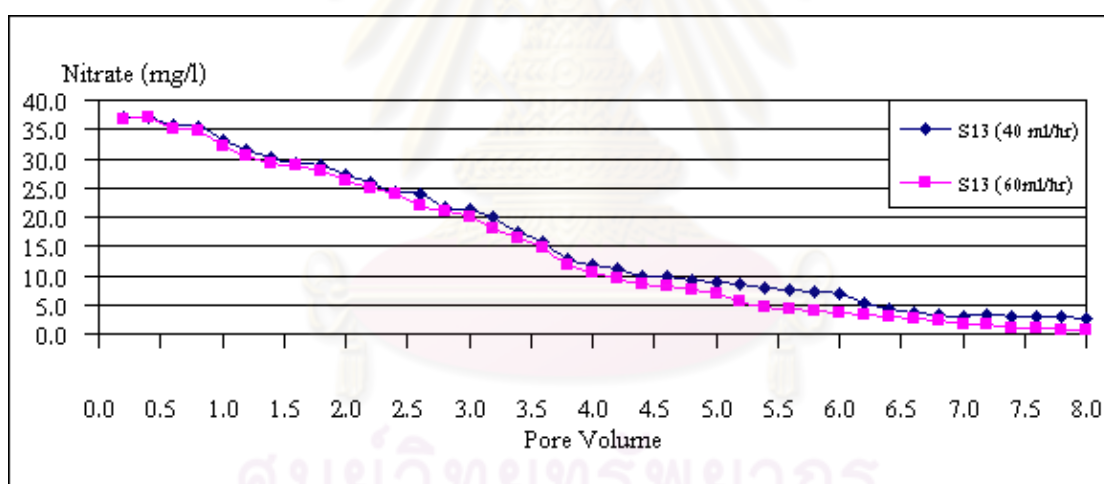
ตัวอย่างดิน	อัตราการไหล (ml/hr)	ไนเตรทจากดินในคอลัมน์ หลังการทดลอง (mg/g sand)			ไนเตรทรวม ในดิน ทั้ง 3 ตำแหน่ง ในคอลัมน์ (mg/g sand)	Recovery Efficiency %
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3		
ชุดที่ 4 (S10)	40	0.00217	0.00178	0.00150	0.00545	82.83
	60	0.00646	0.00183	0.00104	0.00751	86.32
ชุดที่ 5 (S11)	40	0.00230	0.00209	0.00187	0.00631	87.15
	60	0.00639	0.00371	0.00096	0.01106	92.94
ชุดที่ 6 (S13)	40	0.00450	0.00339	0.00306	0.01095	94.40
	60	0.00972	0.00428	0.00162	0.01562	79.49



รูปที่ 4-17 กราฟแสดงความเข้มข้นของไนเตรทใน Effluent กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง ชุดที่ 4 (S10) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-18 กราฟแสดงความเข้มข้นของไนเตรทใน Effluent กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง ชุดที่ 5 (S11) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-19 กราฟแสดงความเข้มข้นของไนเตรทใน Effluent กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง ชุดที่ 6 (S13) ที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนเตรทกับปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง เมื่อปล่อยน้ำ Milli-Q ผ่านคอลัมน์ดิน พบว่าน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์จะค่อย ๆ ชะละลายไนเตรทให้หลุดออกจากตัวอย่างดินในรูปสารละลายไนเตรท ปริมาณไนเตรทในดินจะค่อย ๆ เจือจางลง สังเกตได้จากความเข้มข้นของไนเตรทใน Effluents ที่ค่อย ๆ ลดลงตามเวลา กราฟที่ได้เมื่อนำมาคำนวณพื้นที่ใต้กราฟเพื่อหาปริมาณไนเตรทที่ถูกชะละลายออกมาพร้อมน้ำ (Mass Out) จากนั้นหาผลต่างระหว่างค่าความเข้มข้นของไนเตรทก่อนทำการชะละลายในคอลัมน์ (Mass In) กับ

ปริมาณไนเตรทที่ถูกชะละลายออกมาจากน้ำ (Mass Out) และหาเปอร์เซ็นต์ของไนเตรทที่ถูกชะละลายดังแสดงในตารางที่ 4-6 หลังจากดำเนินการทดลองชะละลายตัวอย่างดินเป็นเวลา 8 ปริมาตรช่องว่างในดินทดลองเสร็จสิ้นแล้วนำดินทดลองแบ่งออกมาเป็น 3 ส่วน จากนั้นแบ่งดินใส่ในปิเกตอร์ติมน้ำ Milli Q ลงไปผสมและกวนเข้าด้วยกัน วัดความเข้มข้นของไนเตรทที่เหลือค้างอยู่ในดิน (Mass เหลือ) ทั้ง 3 ส่วน จะได้ค่ามวลดินรวมที่เหลือในคอลัมน์ และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ไนเตรทที่ถูกชะละลายจะได้ค่า Recovery Efficiency (%) ดังแสดงในตารางที่ 4-7

เมื่อพิจารณาขนาดของเม็ดดินที่ทำการทดลอง ซึ่งตัวอย่างเม็ดดินเรียงลำดับเม็ดดินที่มีความหยาบมากไปตัวอย่างเม็ดดินที่มีความหยาบน้อยได้แก่ ดินทดลองชุดที่ 6 (S13) ดินทดลองชุดที่ 5 (S11) และ ดินทดลองชุดที่ 4 (S10) ผลการทดลองจากตารางที่ 4-6 เม็ดดินที่มีขนาดเล็กเมื่อน้ำไหลผ่านเม็ดดินน้ำจะค่อย ๆ ซึมและชะละลายไนเตรทออกมาทำให้ปริมาณไนเตรทถูกชะละลายออกมาทำให้ปริมาณไนเตรทตกค้างในดินที่อยู่ในคอลัมน์น้อย ต่างกับเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ น้ำจะไหลผ่านเม็ดดินได้เร็วกว่าและชะละลายไนเตรทออกมาได้น้อย ส่งผลให้ปริมาณไนเตรทตกค้างในดินที่อยู่ในคอลัมน์มากกว่า

เมื่อพิจารณาเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนเตรทที่ถูกชะละลายกับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองตามรูปที่ 4-17 ถึง รูปที่ 4-19 นำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นที่ถูกชะละลายออกมาที่อัตราการไหลต่ำ (40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) และอัตราการไหลสูง (60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) พบว่าที่อัตราการไหลต่ำ มีปริมาณไนเตรทที่ถูกชะละลายออกมามากกว่าอัตราการไหลสูง สังเกตได้จากเส้นกราฟที่อัตราการไหลต่ำอยู่นเหนือเส้นกราฟที่อัตราการไหลสูง เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำเมื่อเม็ดดินถูกน้ำชะละลาย น้ำจะค่อย ๆ ชะละลายเม็ดดินที่ปนเปื้อนไนเตรทออกมาทำให้มีปริมาณไนเตรทที่ถูกชะละลายออกมามากและปริมาณไนเตรทที่สะสมในดินในคอลัมน์เหลือน้อย ในทางกลับกัน ที่อัตราการไหลสูงเมื่อเม็ดดินถูกน้ำชะละลาย น้ำที่ชะละลายจะไหลผ่านเม็ดดินไปอย่างรวดเร็วทำให้เม็ดดินสัมผัสกับน้ำได้น้อยกว่าอัตราการไหลต่ำ ปริมาณไนเตรทที่ถูกชะล้างออกมามีปริมาณน้อย และทำให้ไนเตรทที่ตกค้างอยู่ในดินในคอลัมน์มีปริมาณมากกว่าซึ่งการทดลองนี้เป็นไปตามทฤษฎี (Larry W.Canter 2000)

4.2 ผลการศึกษาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์

เนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายถึงผลการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของไนเตรทจากแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D แบ่งออกเป็นสองย่อย 2 ส่วนคือ 1. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ 2. ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของไนเตรทด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D

4.2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของไนเตรทจากแบบจำลองทางกายภาพโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ 1.ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองจากแบบจำลองทางกายภาพ และ 2.ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D 3.ค่าพารามิเตอร์ที่สุ่มป้อนเข้าไปในแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อหาความเข้มข้นของไนเตรทซึ่งผลลัพธ์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D โดยมีรายละเอียดดังนี้

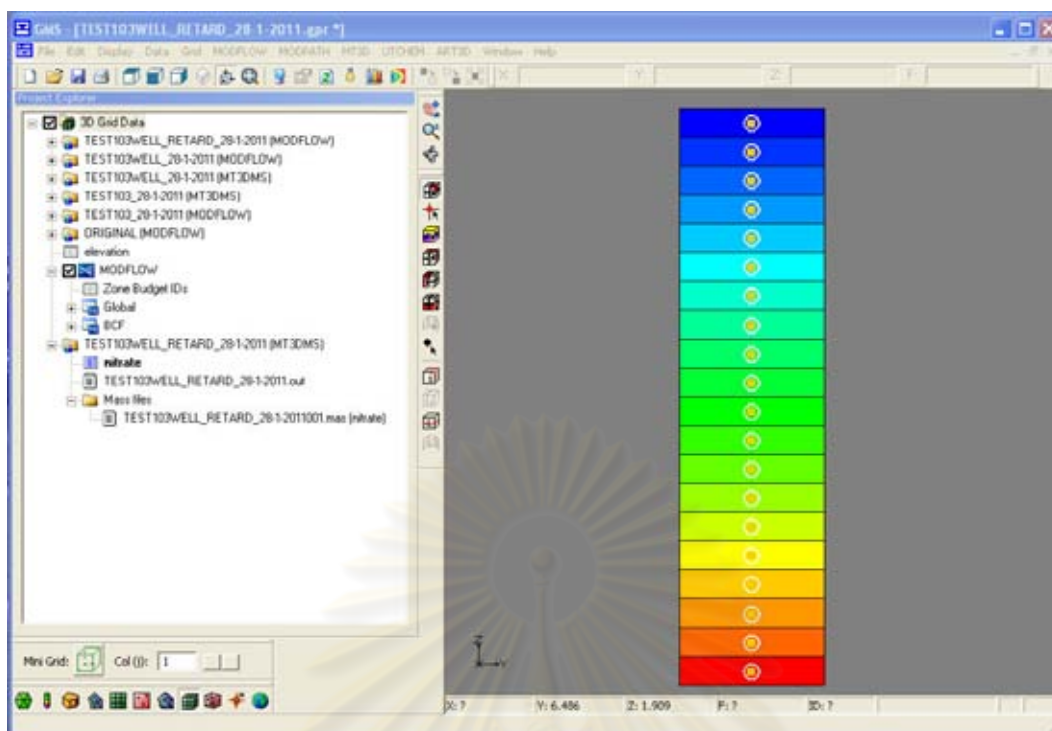
4.2.1.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองจากแบบจำลองทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้น ค่าปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง ค่าความพรุนคำนวณได้จากน้ำหนักดินและน้ำในการบรรจุดินในคอลัมน์ในแต่ละชุดการทดลอง สัมประสิทธิ์ความซึมได้คำนวณจากการทดสอบด้วยระดับน้ำแปรเปลี่ยนในแต่ละชุดการทดลอง สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านคำนวณจากค่าความหนาของคอลัมน์ที่บรรจุดินในแต่ละชุดการทดลอง และค่าตัวประกอบความหน่วงคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทกับค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทรเซอร์

4.2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของไนเตรท ณ เวลาต่าง ๆ

4.2.1.3 ค่าพารามิเตอร์ที่สุ่มป้อนเข้าไปในแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อหาความเข้มข้นของไนเตรทซึ่งผลลัพธ์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D ได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่

การศึกษาในแบบจำลองคณิตศาสตร์ เริ่มจากการกำหนดกริดเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 4-20 แบ่งเป็น 20 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีความสูง 0.5 เซนติเมตร กำหนดให้ทิศทางการไหลของน้ำไหลจากด้านล่างสู่ด้านบน จากนั้นป้อนค่าที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพลงไปแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D ดังตารางที่ 4-8 ทำการเดาสุ่มสัมประสิทธิ์การแพร่และป้อนข้อมูลลงไปแบบจำลองคณิตศาสตร์ ค่าที่ได้จากการจำลองคือค่าความเข้มข้นของไนเตรทที่เวลาต่าง ๆ จากนั้นนำค่าความเข้มข้นที่ได้เทียบกับเวลามาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสัมพันธ์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-21 ถึง 4-38

เมื่อทำการทดลองแล้วเสร็จหนึ่งชุดการทดลองนำกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสัมพันธ์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D มาเปรียบเทียบกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสัมพันธ์กับปริมาตรช่องว่างในดินทดลองที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพและหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination (R Square)) ดังแสดงในตารางที่ 4-9 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) แสดงไว้ในภาคผนวก จ



รูปที่ 4-20 กริดเซลล์แบบจำลองทางกายภาพ

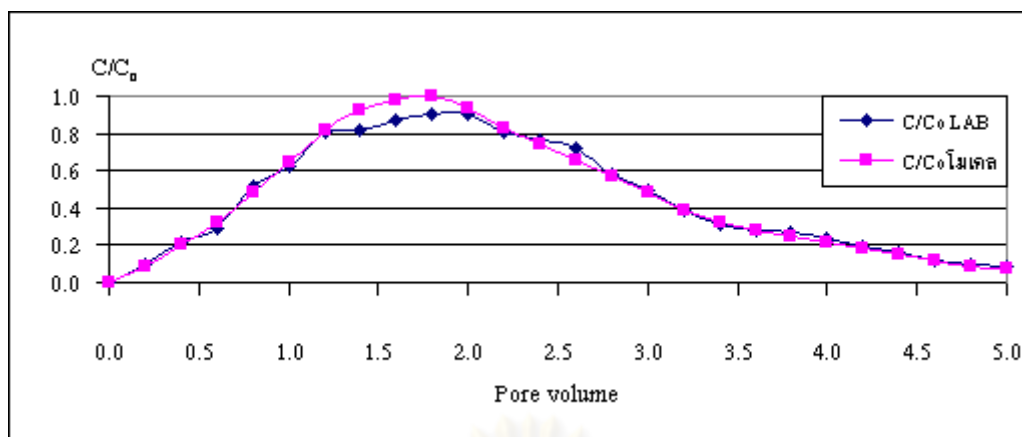
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-8 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D

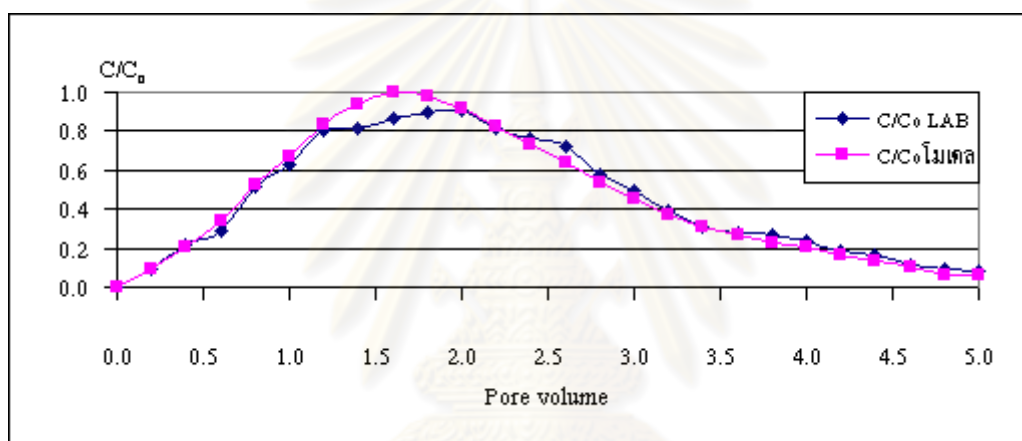
ตัวอย่างดินทดลอง	ชุดที่ 1 (S2)	ชุดที่ 2 (S3)	ชุดที่ 3 (S8)
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	40	40	40
ความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	400	400	400
ความพรุน	0.42	0.41	0.41
สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (ตารางเซนติเมตรต่อวัน)	39.118	50.305	14.508
สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวัน)	15.647	20.122	5.803
ค่าตัวประกอบความหน่วง	1.082	1.110	1.050
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	60	60	60
ความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	400	400	400
ความพรุน	0.42	0.41	0.41
สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (ตารางเซนติเมตรต่อวัน)	39.118	50.305	14.508
สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวัน)	15.647	20.122	5.803
ค่าตัวประกอบความหน่วง	1.072	1.100	1.048

ตารางที่ 4-9 สัมประสิทธิ์การแพร่ที่สุ่มลงในแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination (R Square))

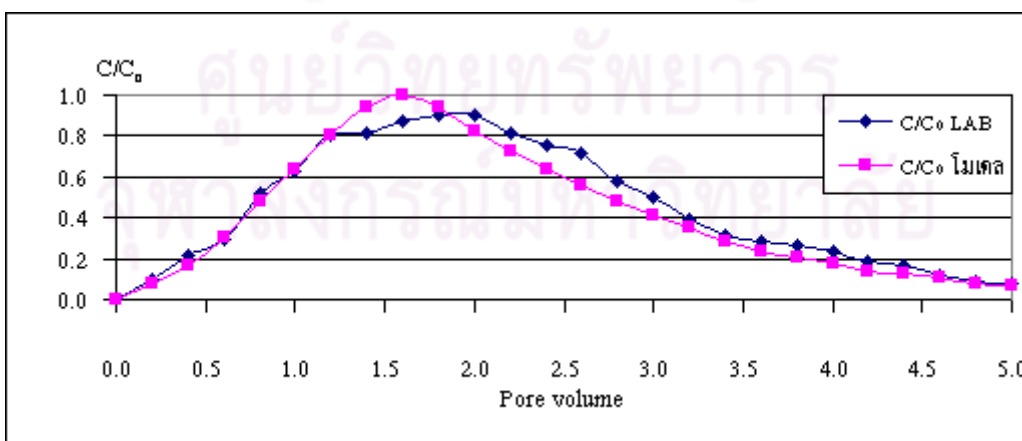
ตัวอย่างดิน	อัตราการไหล (Q) (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Dispersivity) (เซนติเมตร)	ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R ²)
S2	40	2.55	0.977
S2	40	2.41	0.990
S2	40	2.35	0.994
S2	60	2.70	0.995
S2	60	2.79	0.995
S2	60	2.65	0.996
S3	40	4.53	0.988
S3	40	3.60	0.992
S3	40	3.10	0.993
S3	60	4.94	0.990
S3	60	4.85	0.994
S3	60	4.90	0.997
S8	40	2.32	0.993
S8	40	2.25	0.995
S8	40	2.20	0.997
S8	60	2.60	0.992
S8	60	2.50	0.995
S8	60	2.57	0.996



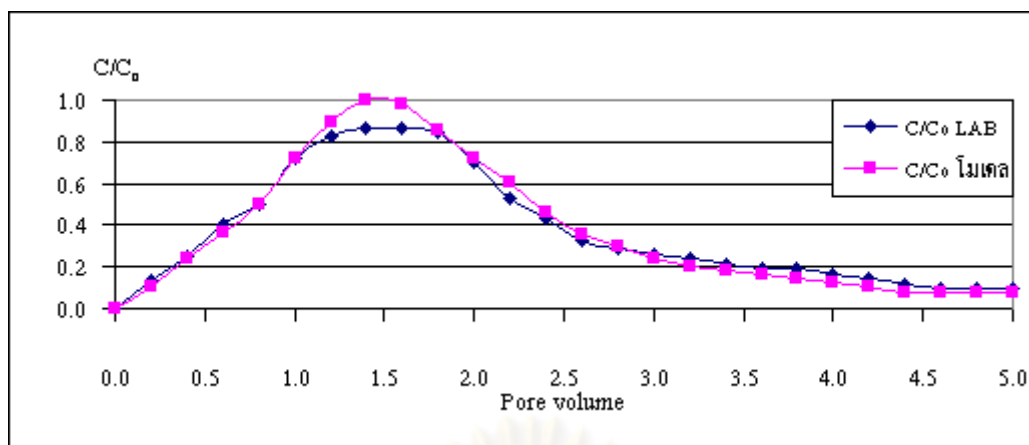
รูปที่ 4-21 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 1 (S2) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.35 เซนติเมตร



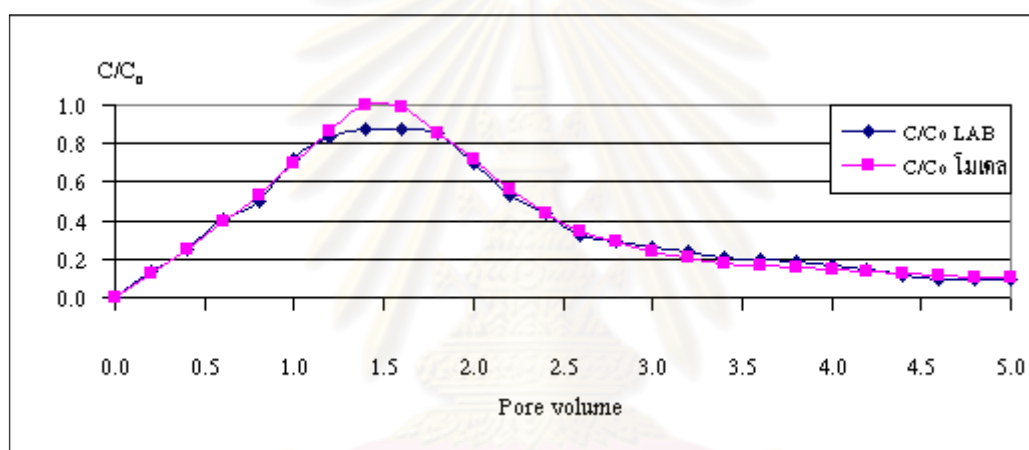
รูปที่ 4-22 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 1 (S2) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.41 เซนติเมตร



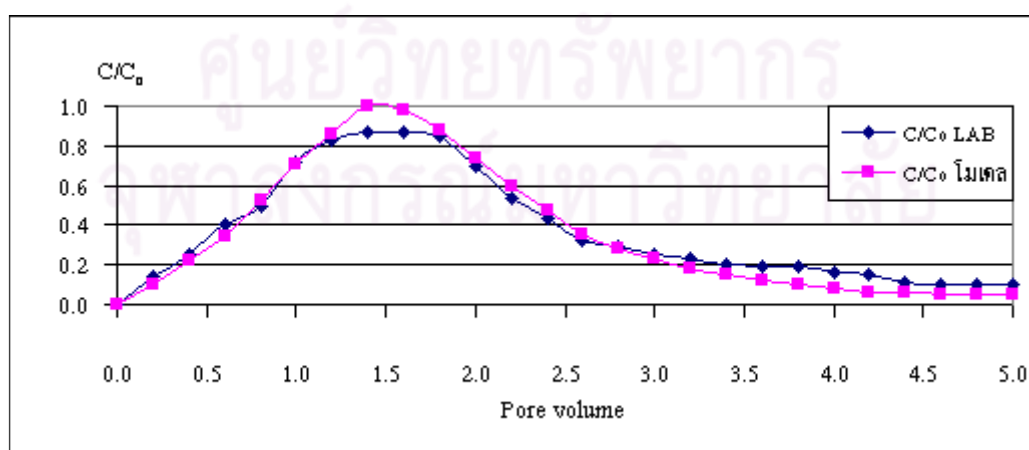
รูปที่ 4-23 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 1 (S2) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.55 เซนติเมตร



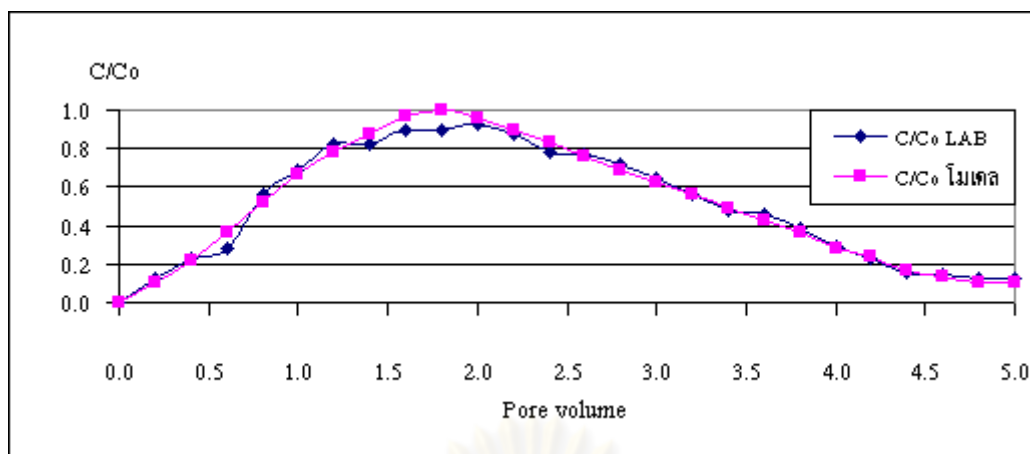
รูปที่ 4-24 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 1 (S2) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.65 เซนติเมตร



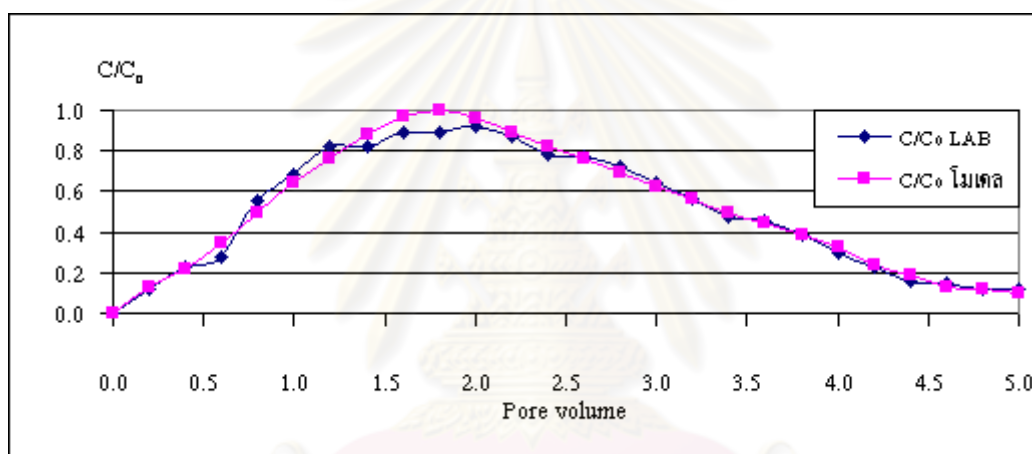
รูปที่ 4-25 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 1 (S2) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.70 เซนติเมตร



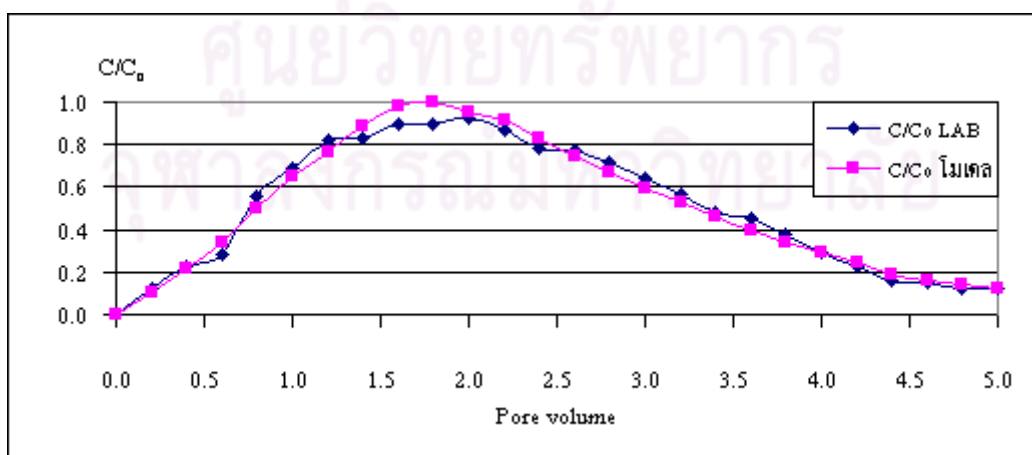
รูปที่ 4-26 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 1 (S2) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.79 เซนติเมตร



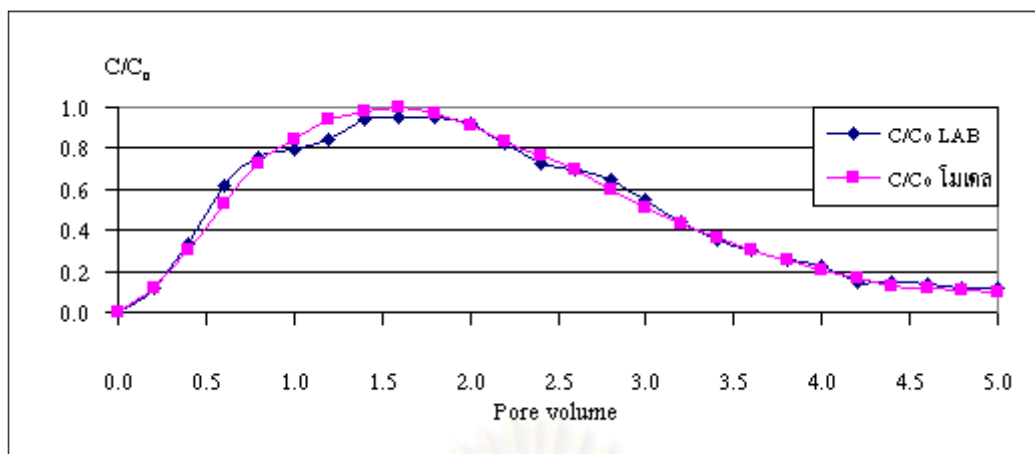
รูปที่ 4-27 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 2 (S3) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 3.10 เซนติเมตร



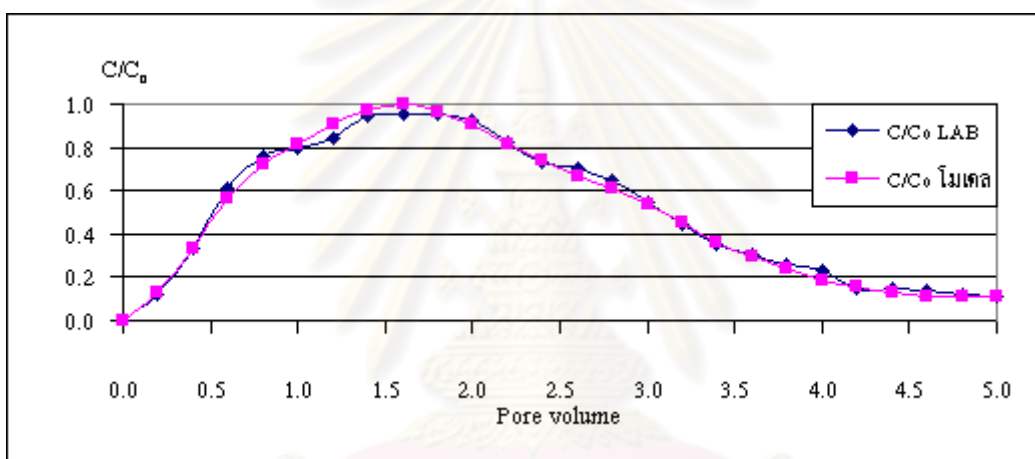
รูปที่ 4-28 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 2 (S3) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 3.60 เซนติเมตร



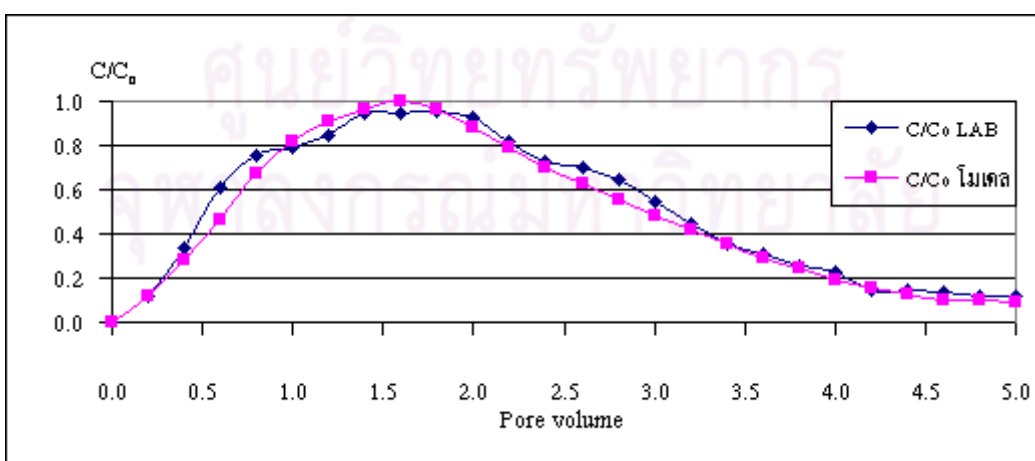
รูปที่ 4-29 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 2 (S3) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.53 เซนติเมตร



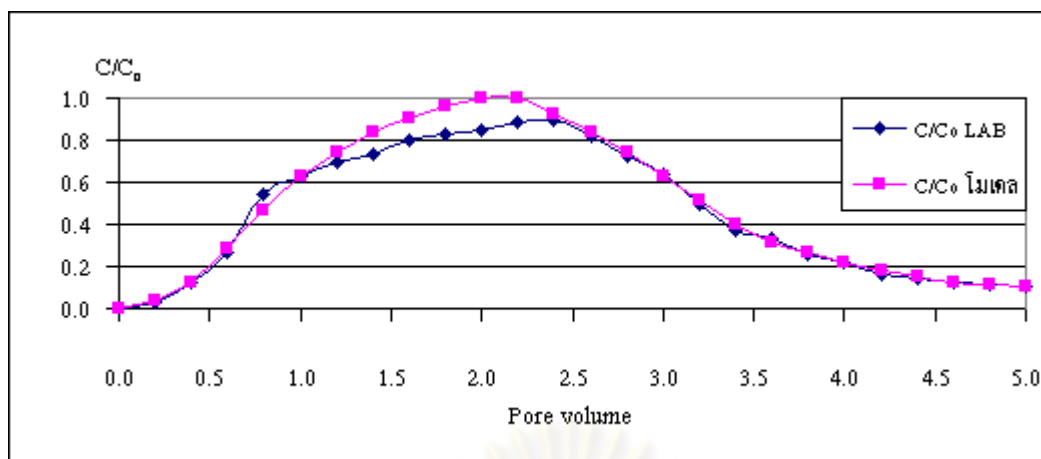
รูปที่ 4-30 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 2 (S3) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.85 เซนติเมตร



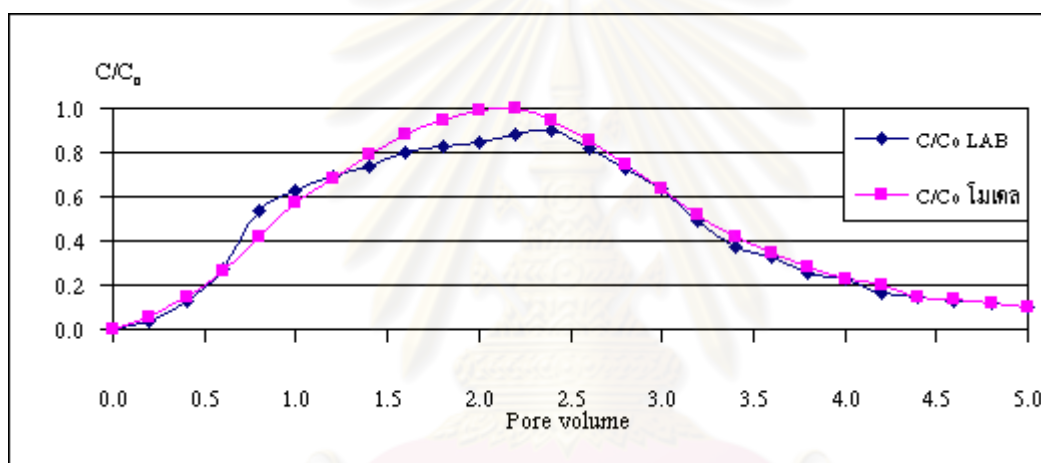
รูปที่ 4-31 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 2 (S3) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.90 เซนติเมตร



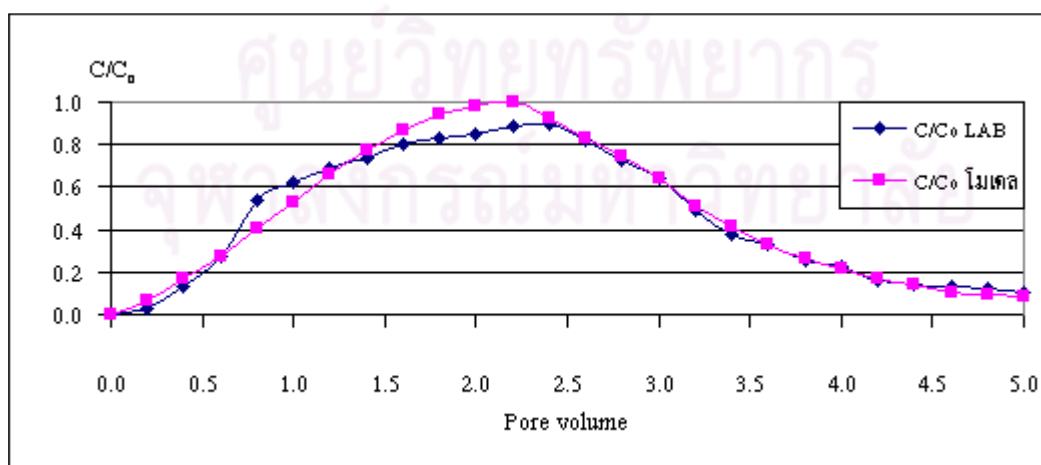
รูปที่ 4-32 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่ 2 (S3) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.94 เซนติเมตร



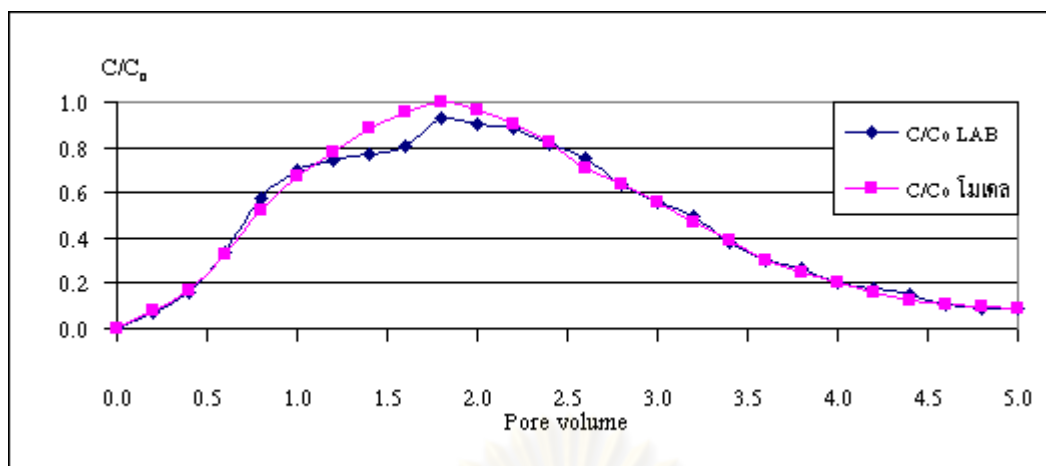
รูปที่ 4-33 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.20 เซนติเมตร



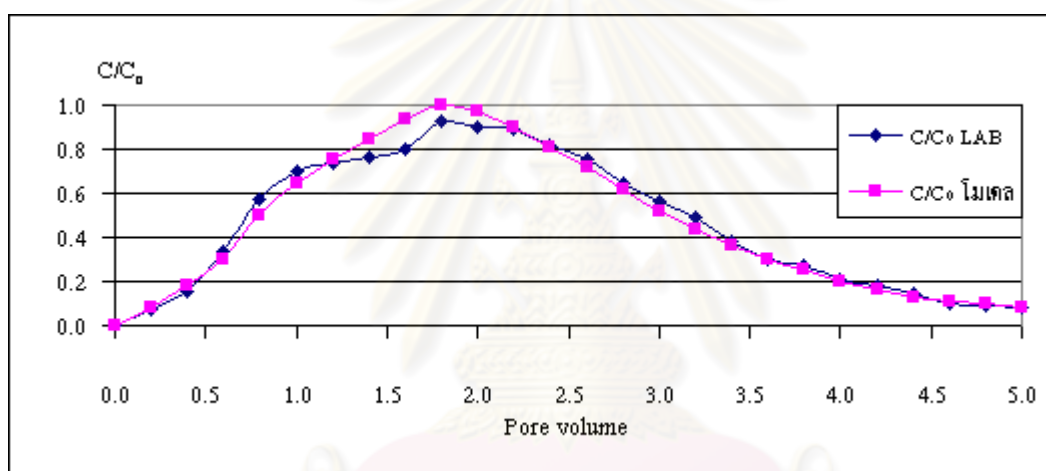
รูปที่ 4-34 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.25 เซนติเมตร



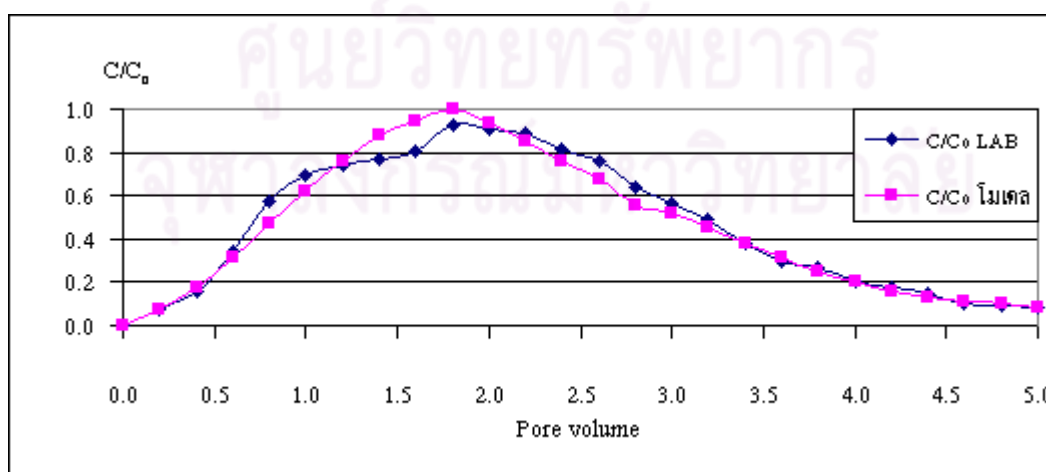
รูปที่ 4-35 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.32 เซนติเมตร



รูปที่ 4-36 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.50 เซนติเมตร



รูปที่ 4-37 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.57 เซนติเมตร



รูปที่ 4-38 ผลการจำลองและผลการทดลองของไนเตรทในดินชุดที่3 (S8) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.60 เซนติเมตร

4.2.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของไนเตรทด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D

จากการเดาสุ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ลงไปแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D ในดิน ตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ที่อัตราการไหลต่ำ (40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) และอัตราการไหลสูง (60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) นำค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองทางกายภาพและหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจออกมาดังแสดงในตารางที่ 4-8

1. ผลการจำลองในตัวอย่างดินทดลองชุดที่ 1 (S2)

การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหล อิมิตัวด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D พบว่าผลการจำลองสอดคล้องกับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ที่ได้จากการทดลองทางกายภาพ ลักษณะของกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ความชันขาขึ้นและขาลงมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเดาสุ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อัตราการไหล 3 ครั้งพบว่าที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้สัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.35, 2.41 และ 2.55 เซนติเมตร ตามลำดับและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจได้ค่าเท่ากับ 0.994, 0.990 และ 0.977 ตามลำดับ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.35 เซนติเมตร เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าเข้าใกล้ 1 สำหรับอัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้สัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.65, 2.70 และ 2.79 เซนติเมตร ตามลำดับและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจได้ค่าเท่ากับ 0.996, 0.995 และ 0.995 ตามลำดับ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.35 เซนติเมตร เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าเข้าใกล้ 1

2. ผลการจำลองในตัวอย่างดินทดลองชุดที่ 2 (S3)

การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหล อิมิตัวด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D พบว่าผลการจำลองสอดคล้องกับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ที่ได้จากการทดลองทางกายภาพ ลักษณะของกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ความชันขาขึ้นและขาลงมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเดาสุ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อัตราการไหล 3 ครั้งพบว่าที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้สัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 3.10, 3.60 และ 4.53 เซนติเมตร ตามลำดับและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจได้ค่าเท่ากับ 0.993, 0.992 และ 0.988 ตามลำดับ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมเท่ากับ 3.10 เซนติเมตร เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าเข้าใกล้ 1 สำหรับอัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้สัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.85, 4.90 และ 4.94 เซนติเมตร ตามลำดับและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจได้ค่าเท่ากับ 0.994, 0.997 และ 0.990 ตามลำดับ ดังนั้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมเท่ากับ 4.90 เซนติเมตร เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าเข้าใกล้ 1

3. ผลการจำลองในตัวอย่างดินทดลองชุดที่ 3 (S8)

การจำลองพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของไนเตรตผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะการไหลอิมพัลส์ด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D พบว่าผลการจำลองสอดคล้องกับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ที่ได้จากการทดลองทางกายภาพ ลักษณะของกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ความชันขาขึ้นและขาลงมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเดาสุ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อัตราการไหลละ 3 ครั้งพบว่าที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้สัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.20, 2.25 และ 2.32 เซนติเมตร ตามลำดับและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจได้ค่าเท่ากับ 0.997, 0.995 และ 0.993 ตามลำดับ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.20 เซนติเมตร เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าเข้าใกล้ 1 สำหรับอัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้สัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.50, 2.57 และ 2.60 เซนติเมตร ตามลำดับและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจได้ค่าเท่ากับ 0.995, 0.996 และ 0.992 ตามลำดับ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.57 เซนติเมตร เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าเข้าใกล้ 1

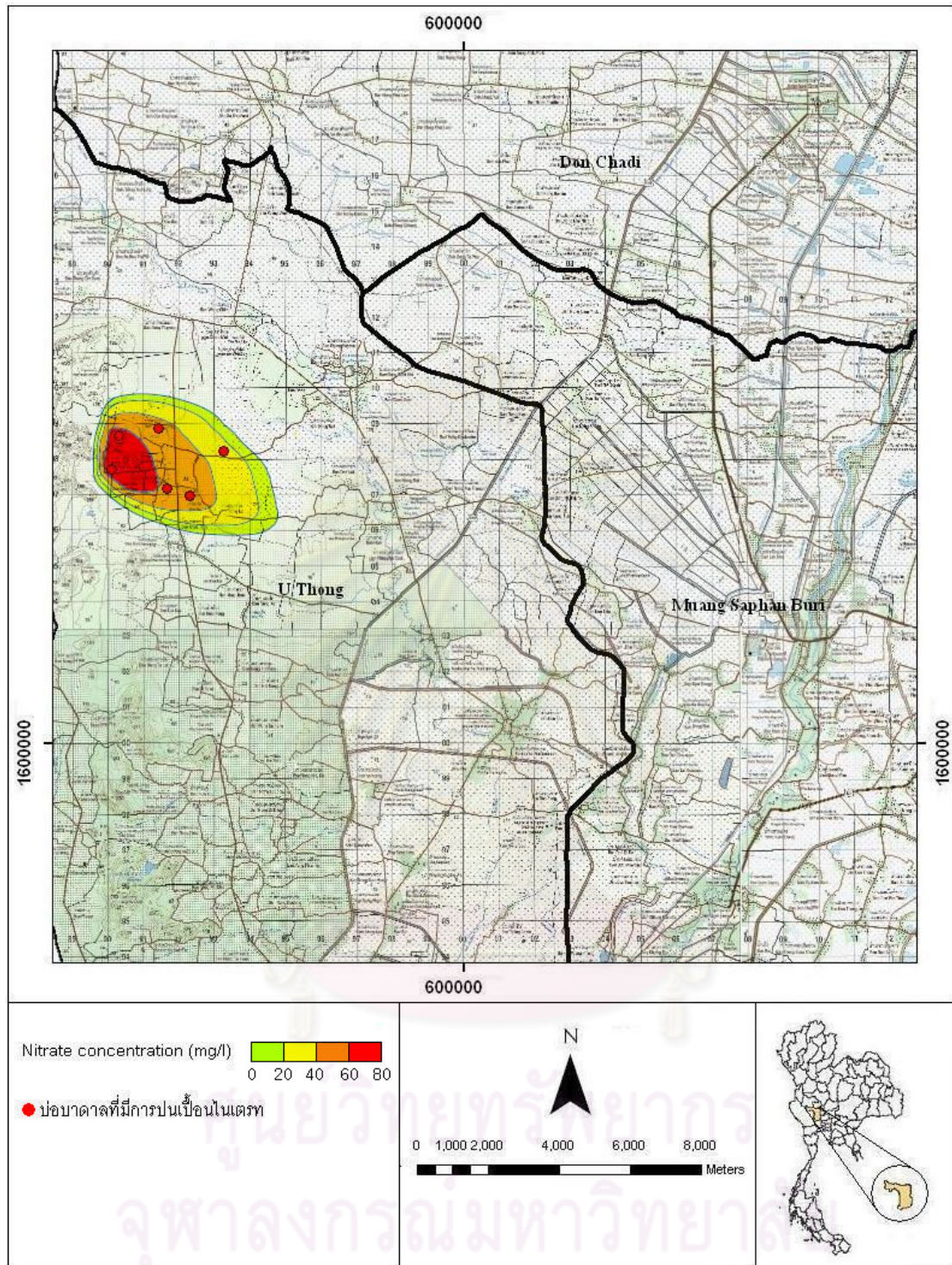
4.2.3 ผลการจำลองการแพร่กระจายของไนเตรตในชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาในระดับ Field Scale

ข้อมูลการปนเปื้อนไนเตรตที่เป็นข้อมูลการปนเปื้อนในพื้นที่ศึกษาเดือนมิถุนายน 2550 และเดือนกุมภาพันธ์ 2551 จากข้อมูลการปนเปื้อนดังกล่าวได้เลือกข้อมูลการปนเปื้อนไนเตรตในเดือนมิถุนายน 2550 มาเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองคณิตศาสตร์ ทำการจำลองสภาพพื้นที่ปนเปื้อนเป็นเวลา 8 เดือน เริ่มตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2550 ไปจนถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2551 เพื่อเปรียบเทียบค่าการปนเปื้อนไนเตรตระหว่างพื้นที่จริงกับแบบจำลองให้เข้าใกล้ความเข้มข้นในเดือนกุมภาพันธ์ 2551 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของแบบจำลองมีค่า 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-39 จากนั้นทดลองปรับสัมประสิทธิ์การแพร่โดยการเดาสุ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ ดังแสดงในตารางที่ 4-10 ผลการเดาสุ่มพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ทำให้การจำลองการปนเปื้อนเข้าใกล้ค่าการปนเปื้อนในเดือนกุมภาพันธ์ 2551 มีค่า 19.6 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-10 การปรับสัมประสิทธิ์การแพร่ของบ่อที่มีการปนเปื้อนเพื่อปรับเทียบค่าการปนเปื้อนไนเตรท

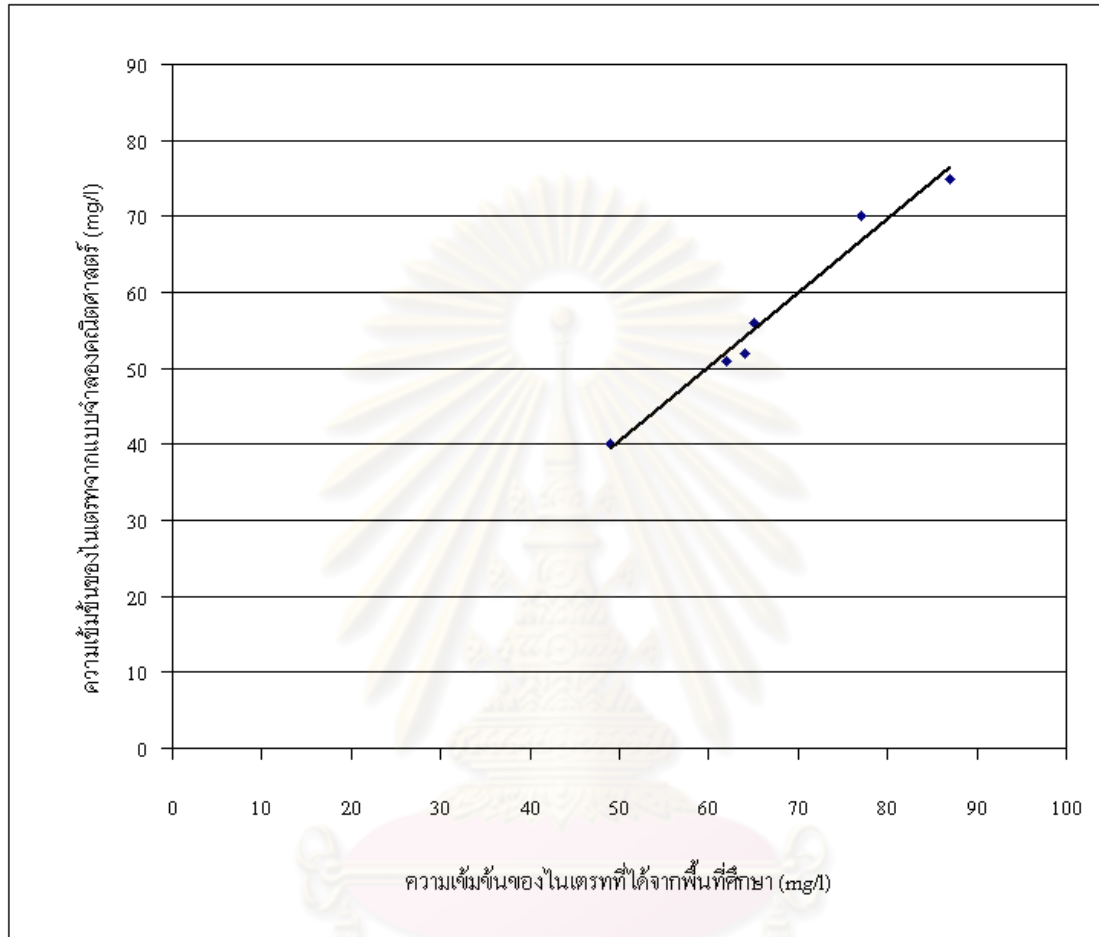
Station	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ความเข้มข้นจากการเดาสุ่ม (mg/l)			
	(mg/l)	(mg/l)	Dispersionity	Dispersionity	Dispersionity	Dispersionity
	มิถุนายน 50	กุมภาพันธ์ 51	4.9 cm	9.8 cm	19.6 cm	29.4 cm
G1	62	64	12	23	52	87
G2	74	77	18	34	70	94
G3	87	87	22	40	75	109
G4	56	65	15	25	56	89
G5	56	62	9	21	51	82
G6	47	49	7	16	40	70

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



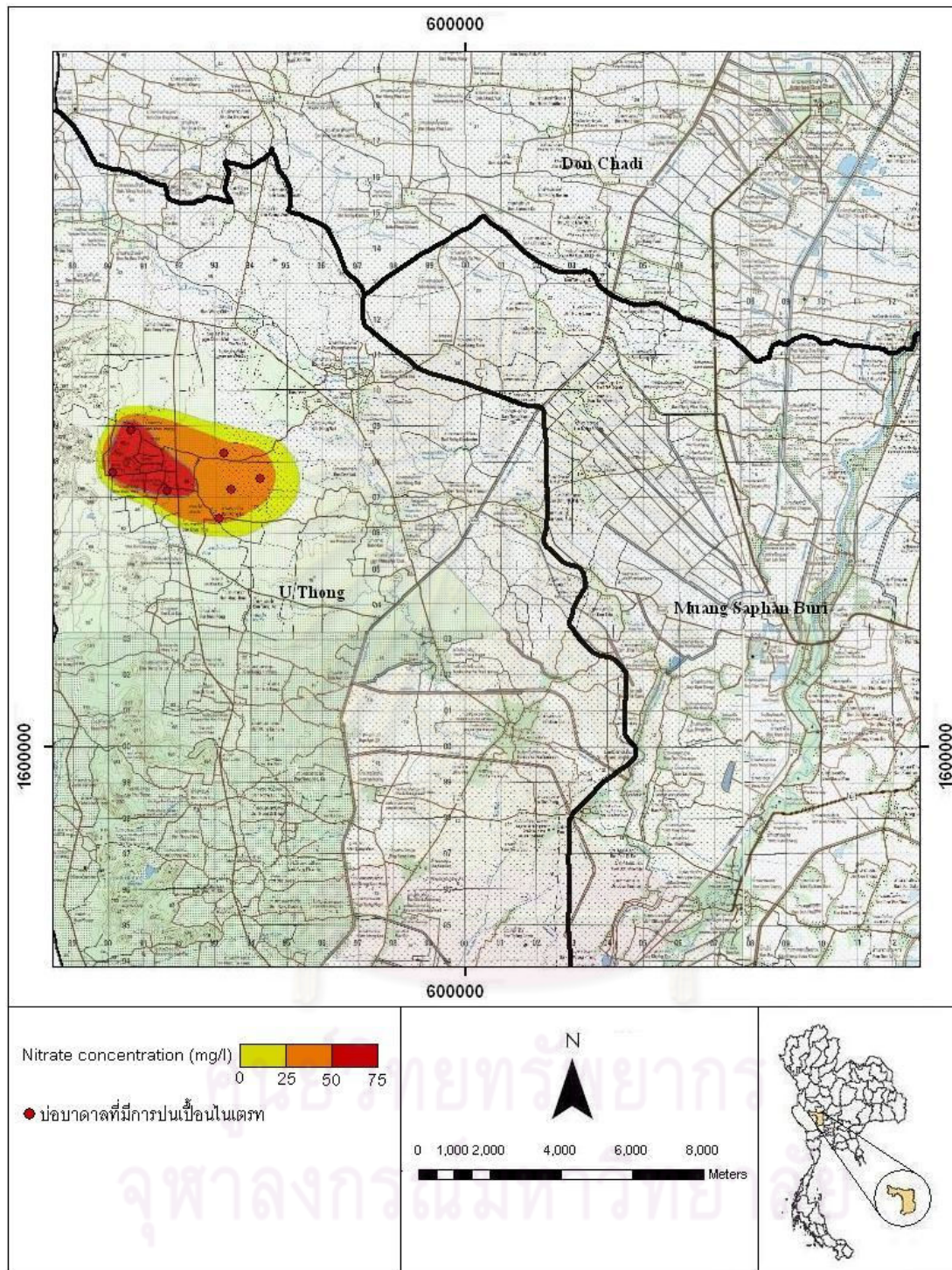
รูปที่ 4-39 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของไนเตรทที่ได้จากพื้นที่จริงกับแบบจำลอง
คณิตศาสตร์

หลังจากได้สัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมแล้ว เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นที่ได้จากพื้นที่จริงกับแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงในกราฟรูปที่ 4-40 และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (R^2) ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 0.988

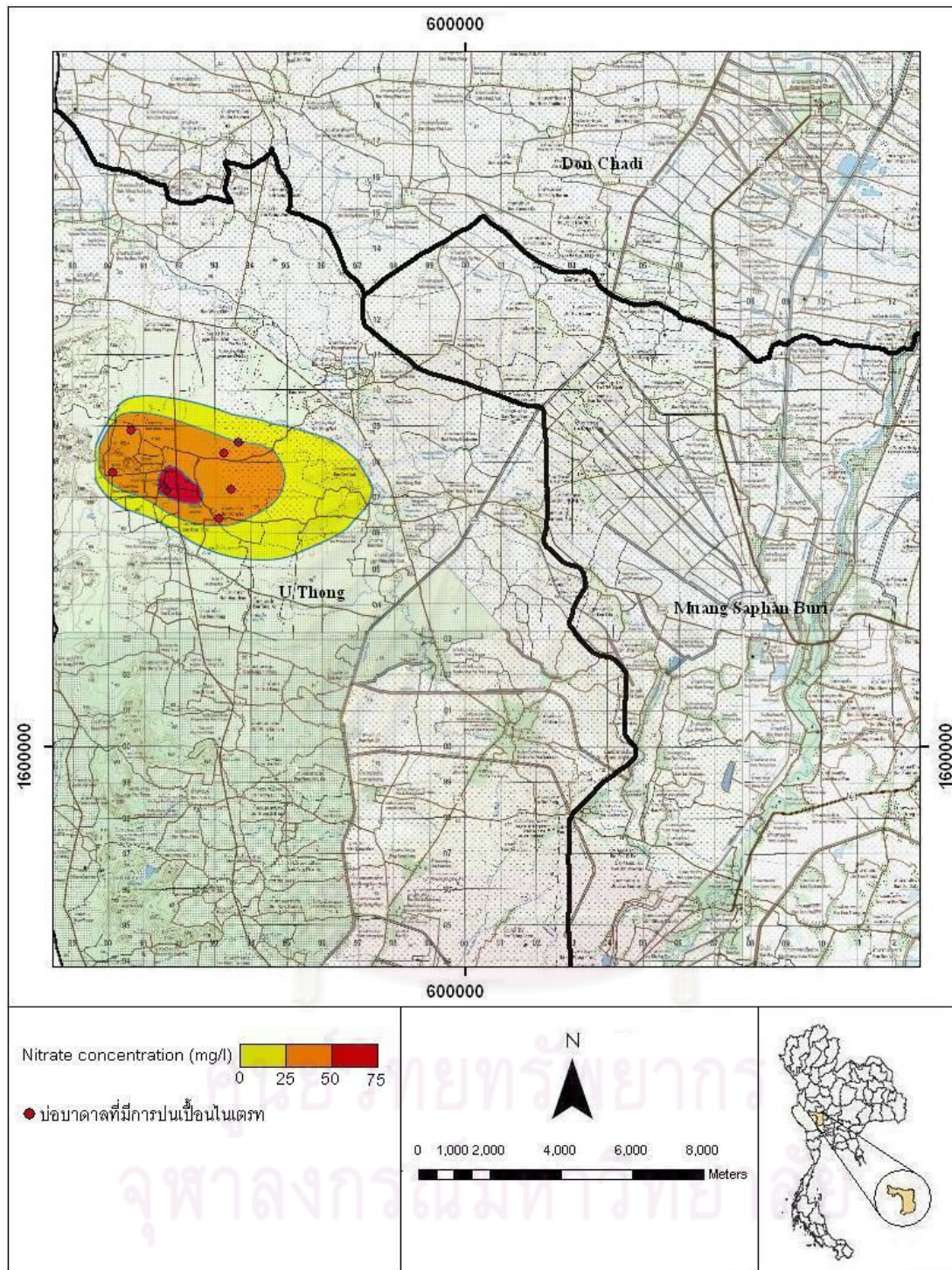


รูปที่ 4-40 เปรียบเทียบความเข้มข้นของไนเตรทที่เก็บได้จากพื้นที่ศึกษากับค่าที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองคณิตศาสตร์

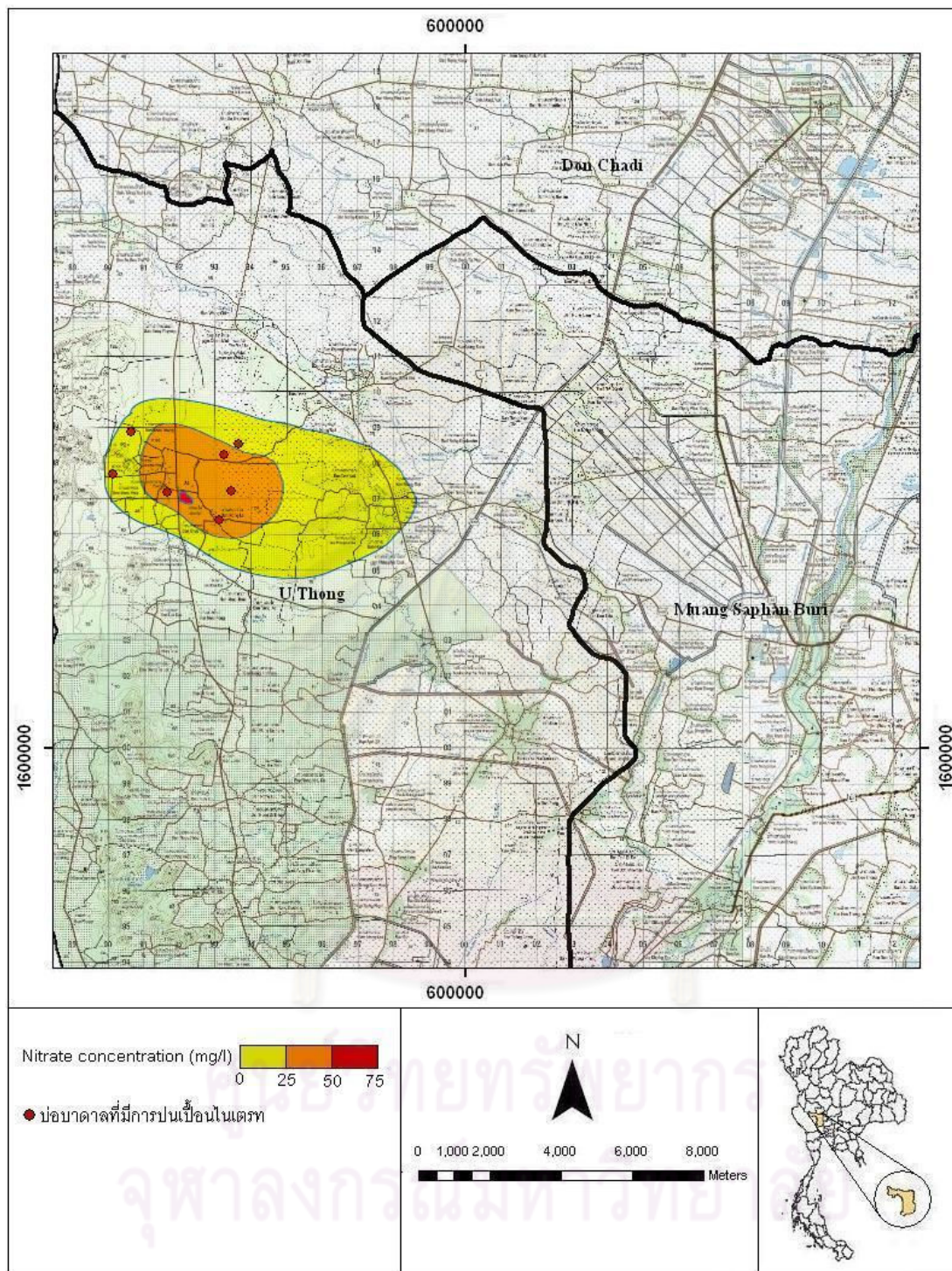
จากนั้นทำการจำลองต่อเนื่องไปเป็นระยะเวลา 50 ปี โดยนำสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการปรับเทียบ เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองคณิตศาสตร์ MT3D พบว่าเส้นชั้นความเข้มข้นของไนเตรทจะเคลื่อนตัวต่อเนื่องไปทางทิศตะวันออกตามทิศทางการไหลของน้ำบาดาล ดังแสดงในรูปที่ 4-41 ถึง 4-44 เมื่อระยะเวลามากขึ้นความเข้มข้นของไนเตรทที่แพร่กระจายจะมีค่าลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป



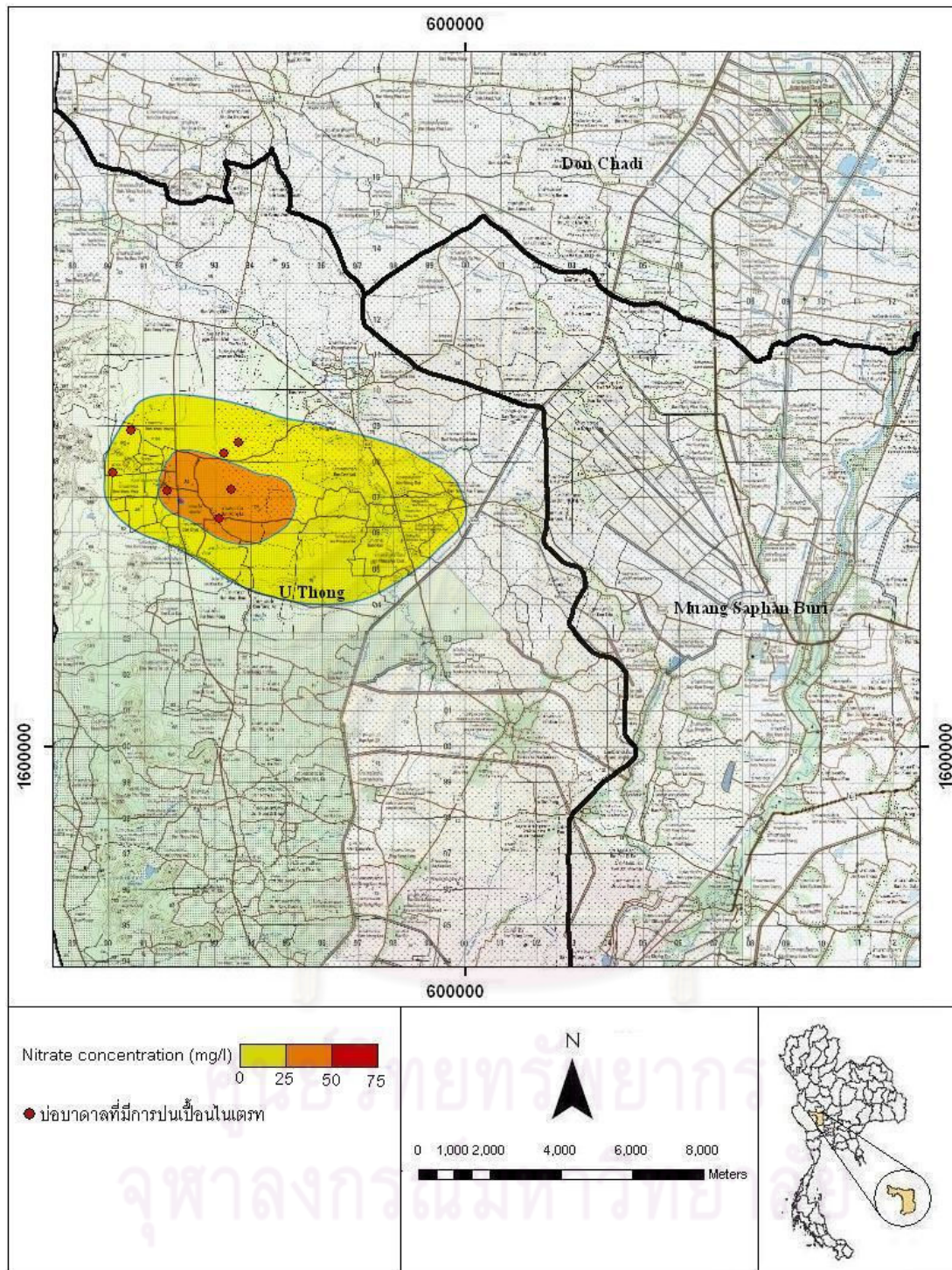
รูปที่ 4-41 การแพร่กระจายของไนเตรทในพื้นที่ศึกษาที่เวลา 3 ปี



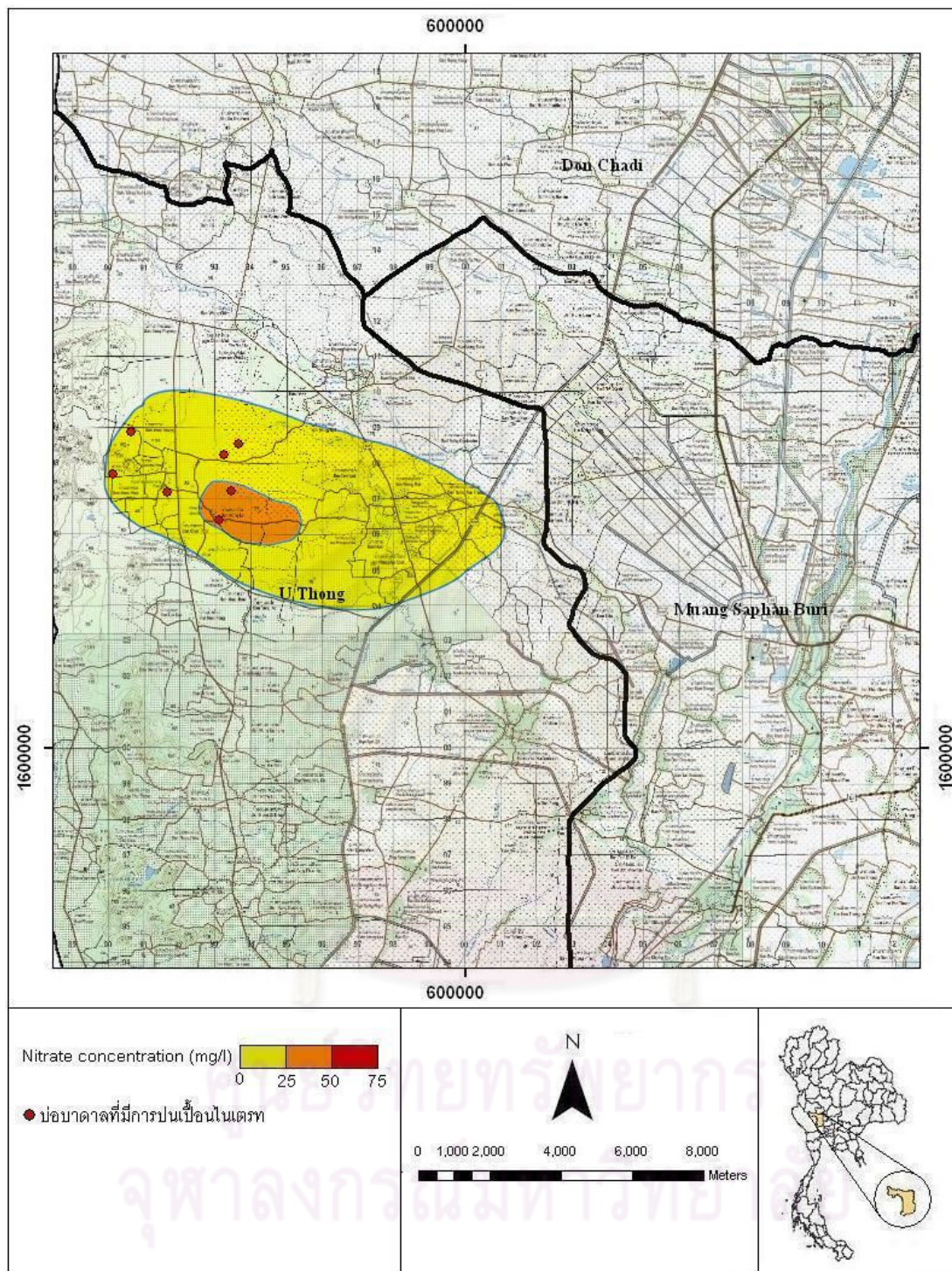
รูปที่ 4-42 การแพร่กระจายของไนเตรทในพื้นที่ศึกษาที่เวลา 10 ปี



รูปที่ 4-43 การแพร่กระจายของไนเตรทในพื้นที่ศึกษาที่เวลา 20 ปี



รูปที่ 4-44 การแพร่กระจายของไนเตรทในพื้นที่ศึกษาที่เวลา 30 ปี



รูปที่ 4-45 การแพร่กระจายของไนเตรทในพื้นที่ศึกษาที่เวลา 50 ปี

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยบทสรุปผลการศึกษา แนวทางการฟื้นฟูแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนด้วยไนเตรท และข้อเสนอแนะจากการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 การสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลดินและน้ำใต้ดินเพื่อศึกษาวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทในชั้นดินและชั้นน้ำไม่อิ่มตัวที่มีศักยภาพในการถูกชะละลายและก่อให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินอิ่มตัวภายใต้สภาวะการเติมน้ำ (Recharge Rate) ลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

การเก็บตัวอย่างตัวกลางรูพรุนในการทดลองจากพื้นที่ศึกษาใน อ.อุทุมพร จ.สุพรรณบุรี โดยเก็บตัวอย่างตามพื้นที่จริงที่มีการสำรวจร่วมกับกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2550) พบว่าดินทั้งหมด 160 ตัวอย่างพบการปนเปื้อนไนเตรทเกินมาตรฐาน น้ำใต้ดิน 38 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างน้ำใต้ดินใน อ.อุทุมพร มีไนเตรทเกินมาตรฐานอยู่ทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง โดยมีแบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 2 ชนิดคือ ตัวกลางรูพรุนที่ไม่มีการปนเปื้อนไนเตรท จำนวน 6 ตัวอย่าง และตัวกลางรูพรุนที่มีการปนเปื้อนไนเตรทจำนวน 6 ตัวอย่าง หลังจากเก็บตัวอย่างดิน ทำการทดลองหาการกระจายเม็ดดินแบบ Wet Sieve Analysis สามารถแบ่งชุดดินที่ไม่มีการปนเปื้อนไนเตรท และชุดดินที่มีการปนเปื้อนไนเตรท ออกเป็น 6 ตัวอย่าง คือ ดินที่ไม่มีการปนเปื้อนไนเตรท ได้แก่ ตัวอย่างดิน S3, S2 และ S8 ตามลำดับจากเม็ดดินที่มีความละเอียดมากไปน้อย ลักษณะกราฟของกลุ่มชุดดินจะจับกลุ่มในลักษณะห่างกัน เนื่องจากจุดเก็บตัวอย่างดินอยู่ไกลกัน และดินที่มีการปนเปื้อนไนเตรท ได้แก่ ตัวอย่างดิน S13, S11 และ S10 ตามลำดับจากเม็ดดินที่มีความละเอียดมากไปน้อย ลักษณะกราฟของกลุ่มชุดดินจะจับกลุ่มรวมกัน เนื่องจากจุดเก็บตัวอย่างดินอยู่ในบริเวณเดียวกัน

5.1.2 การศึกษาลักษณะและพฤติกรรมการกระจายตัวและการเคลื่อนตัวของไนเตรทในระบบชั้นน้ำใต้ดินแบบอิ่มตัว (Saturated Groundwater Flowing System) โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) แบบคอลัมน์

ก. การทดลองในดินที่ไม่มีการปนเปื้อนไนเตรท

ผลการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

1. ไนเตรทเคลื่อนตัวผ่านตัวกลางรูพรุนได้ช้ากว่าเทอร์เซอร์และมวลสารปนเปื้อนส่วนหนึ่ง ยังคงตกค้างภายในตัวกลางรูพรุน ลักษณะ Breakthrough Curve แสดงปรากฏการณ์เทลลิงเอฟเฟคอย่างชัดเจน เป็นผลจากไนเตรทที่ตกค้างอยู่ในคอลัมน์ซึ่งเกิดจากระบวนการดูดซับของไนเตรทในตัวกลางรูพรุนแม้ว่าจากการทดลองจะมีปรากฏการณ์ Early Breakthrough ของไนเตรทในทุกตัวอย่างดินที่ทดลองอันเนื่องมาจากผลของ Charge Exclusion

2. ค่าตัวประกอบความหน่วงของไนเตรทจากดินทดลองชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงมีค่า 1.082, 1.110 และ 1.050 ตามลำดับ และค่าตัวประกอบความหน่วงของไนเตรทจากดินทดลองชุดที่ 1-3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงมีค่า 1.072, 1.100 และ 1.048 ตามลำดับ แม้ว่าค่าตัวประกอบความหน่วงมีค่ามากกว่า 1.00 แต่โดยรวมแล้วมีค่าไม่สูงนัก แสดงว่าไนเตรทมีแนวโน้มเคลื่อนที่ไปพร้อมกับน้ำใต้ดินได้ดี สามารถแพร่กระจายได้ดีส่งผลให้มีศักยภาพในการแพร่กระจายในแหล่งน้ำใต้สูง ซึ่งค่าตัวประกอบความหน่วงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือตัวกลางรูพรุนและอัตราการไหลของน้ำ จากการทดลองค่าตัวประกอบความหน่วงของไนเตรทมีค่ามากกว่า 1 ทำให้ไนเตรทบางส่วนถูกดูดซับไว้ในตัวกลางรูพรุน ค่าตัวประกอบความหน่วงที่ได้จากการทดลองครั้งนี้มีค่าสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (ค่าตัวประกอบความหน่วงของไนเตรทมีค่าระหว่าง 0.8-3.0 (Schepers and Raun 2008))

3. การศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของไนเตรทในตัวกลางรูพรุนชุดที่ 1-3 เมื่อดำเนินการทดลองโดยใช้ตัวกลางรูพรุนชนิดเดียวกันและปรับอัตราการไหลของน้ำในระบบทดลองให้สูงขึ้นจากอัตราการไหล 40 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้มีการตรวจพบไนเตรทในตัวอย่างน้ำที่ออกจากคอลัมน์ได้เร็วขึ้น โดยสังเกตได้จาก Breakthrough Curve ของไนเตรทที่ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเดินทางมาถึงท้ายคอลัมน์ก่อน เมื่อทำการคำนวณเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทพบว่าการปรับอัตราการไหลให้สูงขึ้นส่งผลให้เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของไนเตรทลดลง 32.4%, 37.9% และ 37.1% ในดินทดลอง S2, S3 และ S8 ตามลำดับ

ข. การทดลองในดินที่มีการปนเปื้อนไนเตรท

ผลการทดลองการวิเคราะห์พฤติกรรมการชะละลายของไนเตรทจากชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินแบบอิมิตัว

. ดำเนินการทดลองโดยเลือกใช้ Recharge Rate ในช่วงค่าที่ใกล้เคียงกับ Recharge Rate จริงของพื้นที่ศึกษา ผลการทดลองที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง มีไนเตรทที่ถูกชะละลายออกมา 85.25, 84.48 และ 83.75 % เทียบกับปริมาณไนเตรทเริ่มต้นในดิน ในตัวอย่างดิน S10, S11 และ S13 ตามลำดับ และที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง มีไนเตรทที่ถูก

ชะละลายออกมา 80.49, 74.50 และ 72.48 % ในตัวอย่างดิน S10, S11 และ S13 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนเตรทที่ถูกชะละลายกับปริมาตรช่องว่างในดินทดลอง เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นที่ถูกชะละลายออกมาที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่าที่อัตราการไหลต่ำ มีปริมาณไนเตรทที่ถูกชะละลายออกมามากกว่าอัตราการไหลสูง เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำน้ำจะชะละลายเม็ดดินที่ปนเปื้อนไนเตรทออกมามากกว่าเนื่องจากมีเวลาสัมผัสนานกว่า

5.1.3 การจำลองลักษณะและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของไนเตรทผ่านระบบชั้นน้ำใต้ดินแบบอิ่มตัว (Saturated Groundwater Flowing System) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MODFLOW และ MT3D

ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของไนเตรทด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ MODFLOW และ MT3D ของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชุด การทดลองที่อัตราการไหล 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลการจำลองสอดคล้องกับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ ลักษณะของกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยค่าการแพร่ที่ได้ออกมาซึ่งข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองได้ค่าดังนี้ ดินทดลองชุดที่ 1 (S2) ดินทดลองชุดที่ 2 (S3) และดินทดลองชุดที่ 3 (S8) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้สัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.35, 3.10 และ 2.20 เซนติเมตร ตามลำดับ และที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้สัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.65, 4.90 และ 2.57 เซนติเมตร ตามลำดับ

5.1.4 การคาดการณ์การแพร่กระจายของไนเตรทในชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาในระดับ Field Scale

แบบจำลองน้ำใต้ดินในการศึกษาครั้งนี้ ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MODFLOW และ MT3D ในส่วนของการออกแบบจำลองได้ใช้วิธีการ Finite Difference ที่มีหน่วยย่อยการคำนวณเชิงพื้นที่ในรูปของโครงสร้างที่ต่อกันด้วยรูปสี่เหลี่ยม โดย 1 กริดเซลล์ มีขนาด 50 x 50 เมตร

การเปรียบเทียบแบบจำลองโดยจำลองระดับน้ำใต้ดิน เปรียบเทียบกับข้อมูลระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์ ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินไหลจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออก ระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองกับระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์มีทิศทางการไหลไปในทางเดียวกัน และมีเส้นชั้นความสูงของระดับน้ำใกล้เคียงกัน และให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจเท่ากับ 0.977

การเปรียบเทียบแบบจำลองในส่วนของความเข้มข้นไนเตรทที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาลซึ่งจำนวน 6 บ่อ การปรับแก้แบบจำลองได้พิจารณาผลการคำนวณเทียบกับความเข้มข้นของไนเตรทจากบ่อบาดาลที่มีการปนเปื้อนในช่วงเดือน มิถุนายน 2550 และเดือน

กุมภาพันธ์ 2551 โดยผลการเปรียบเทียบ ได้สัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสม 19.6 เซนติเมตร และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดลินใจเท่ากับ 0.988

จากการจำลอง ได้ทำการจำลองสภาพพื้นที่ปนเปื้อนเป็นเวลา 3 ปี เพื่อต้องการประมาณปริมาณสารปนเปื้อนและขอบเขตการปนเปื้อนเปรียบเทียบกับสภาพปัจจุบันของพื้นที่ศึกษาพบว่าความเข้มข้นของไนเตรทที่ระดับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก) เคลื่อนตัวออกไปทางทิศตะวันออกจนถึงถนนมาลัยแมน (ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 321) ครอบคลุมขอบเขตของตำบลอุ้มอ่อง พื้นที่ประมาณ 11.4 ตารางกิโลเมตร จำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบ 3,102 คน

จากนั้นได้ทำการจำลองต่อเนื่องไปเป็นระยะเวลา 50 ปี พบว่าความเข้มข้นของไนเตรทที่ระดับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเคลื่อนตัวต่อเนื่องไปทางทิศตะวันออก การแพร่กระจายของไนเตรทจะเคลื่อนตัวผ่านบ้านจะเข้าสามพัน ซึ่งมีจำนวนครัวเรือนที่จะได้รับผลกระทบจากการแพร่กระจายของไนเตรท 4,587 ครัวเรือน

5.2 แนวทางการบำบัดการปนเปื้อนไนเตรท

แนวทางในการบำบัดการปนเปื้อนไนเตรทสามารถทำได้โดยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

1. **การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)** ทำการทดลองโดยเจาะบ่อสูบน้ำ สูบน้ำที่มีการปนเปื้อนไนเตรทเข้ามาเก็บไว้ในบ่อพักและนำน้ำผ่าน Ion Exchange โดยใช้เรซินซึ่งมีไอออนอิสระที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนในน้ำได้ แต่ไม่ละลายน้ำและมีช่องว่างภายในโครงสร้างโมเลกุลอย่างเพียงพอเพื่อให้ไอออนต่าง ๆ ผ่านเข้าออกได้อย่างสะดวก

2. **วิธีการ Biomediation** เป็นกระบวนการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยการนำดินหรือน้ำที่มีการปนเปื้อนไนเตรท จากนั้นใส่แบคทีเรียเข้าไปทำปฏิกิริยาทำให้เปลี่ยนไนเตรทเป็นก๊าซไนโตรเจน

3. **วิธีการ Filtration** ทำการทดลองโดยใช้เครื่องกรองน้ำกรองไอออนต่าง ๆ ที่มีการปนเปื้อนไนเตรทออกมาเป็นน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งวิธีการนี้ใช้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง

4. **Permeable Reactive Barrier** ทำการบำบัดพื้นที่บริเวณที่มีการปนเปื้อนโดยเจาะเป็นกำแพงลงไปยังชั้นน้ำใต้ดิน จากนั้นใส่ Zero Ion (Fe^0) ลงไปเพื่อลดการปนเปื้อนของไนเตรท

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้พบประเด็นและแนวทางการแก้ไขในการทดลองดังนี้

1. ในการบรรจุตัวอย่างดินลงในคอลัมน์เมื่อปล่อยน้ำเข้าสู่คอลัมน์หากดินที่บรรจุในคอลัมน์เกิดการร้าวหรือแตกออกจากกัน หรือในกรณีที่เครื่องสูบน้ำไม่สามารถสูบน้ำเข้าไปในคอลัมน์ได้ทำให้ดินเกิดการตัน จำเป็นต้องทำการบรรจุดินและทำการทดลองใหม่

2. การใช้เครื่องวัดความนำไฟฟ้า Microprocessor Conductivity Meter เมื่อทำการวัดเทอร์เซอร์เสร็จแล้ว ควรชะล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อไม่ให้มีสารตกค้างติดอยู่ที่หัววัดเพราะจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดความเข้มข้นของเทอร์เซอร์ในครั้งต่อไป และไม่ควรผสมสารละลายเทอร์เซอร์ที่มีความเข้มข้นเกิน 2,110 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เนื่องจากความเข้มข้นในช่วงนี้เครื่องวัดความนำไฟฟ้าสามารถให้ค่าความนำไฟฟ้าที่ละเอียดได้

3. ในการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ นอกจากมีข้อมูลจากการจำลองทางกายภาพ ควรมีข้อมูลที่รวบรวมจากหน่วยงานต่าง ๆ อย่างครบถ้วนเพื่อสะดวกในการใช้งานป้อนข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองคณิตศาสตร์

4. ขั้นตอนการศึกษาโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ต้องใช้เวลาในการศึกษามาก ควรเผื่อเวลาในการเรียนรู้ และขอคำแนะนำจากผู้มีประสบการณ์เกี่ยวกับการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ มานะจิตต์. การจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจำพวก สารอินทรีย์ระเหยในตัวกลางรูพรุน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม แหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

ควบคุมมลพิษ,กรม. มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2543.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. รายงานเบื้องต้นการศึกษาการใช้น้ำบาดาลร่วมกับน้ำผิวดินบริเวณ ภาคกลางตอนบน. 2548.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ภาคผนวกเล่มที่2 การศึกษาการใช้น้ำบาดาลร่วมกับน้ำผิวดินบริเวณ ภาคกลางตอนบน. 2549.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาวิจัยการประเมินความเสี่ยงของ การปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำใต้ดินในบริเวณ จ.นครราชสีมา. กรกฎาคม 2550.

ฉลอง บัวผัน. 2538. น้ำบาดาล. จำนวน 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. โอ.เอส.พริ้นติ้ง เฮ้าส์ 113/13 ซอยวัดสุวรรณคีรี ถ.พระบรมราชชนนี เขตบางกอกน้อย กรุงเทพฯ 10700 : โอเดียนสโตร์ เดชาวุธ จารุตามระ. ปฏิวัติวิศวกรรมเบื้องต้น, 2527.

दनัย จำปานิล. การวางแผนจัดสรรน้ำภายใต้การใช้น้ำร่วมในพื้นที่โครงการชลประทานชั้นสูตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

ธารทิพย์ พันธุ์เมธาฤทธิ์. การปรับเสถียรดินปนเปื้อนในเหมืองถ่านหินโดยการใช้เถ้าลอยจาก เตาเผาขยะชุมชนและฝุ่นปูนซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาจัดการ สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ปณต ศิริพุทธิชัยกุล. การจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ด้านเหนือของที่ราบภาคกลาง ตอนล่าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ไศภิชฐ์ ภิรมย์เลิศ. ไนเตรทในน้ำบาดาล บริเวณ อ.เมือง จ.ของแก่น. การประชุมวิชาการ กทช.ปี 2538 เรื่อง "ความก้าวหน้าและวิสัยทัศน์ของการพัฒนาทรัพยากรธรณี" 2(1) (2538) : 629-644.

- วินัย เขาวนวิวัฒน์. การจำลองสภาพการรुकูล้ำของน้ำเค็มในชั้นน้ำนันทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2542.
- สนธิ์ จินดาสงวน. การจำลองสภาพน้ำใต้ดินในพื้นที่จังหวัดกำแพงเพชร. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2540.
- อิงอร ชัยศรี. การเปรียบเทียบวิธีหาปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนในน้ำโดยวิธีลดสเกลและวิธี
มาตรฐาน APHA 4500-NO₃B. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,
2539.

ภาษาอังกฤษ

- Al-Damluji, O.A. and Al-Rawi, M.A. Experimental and numerical investigations of dispersion and transport of pollutants in an Iraqi soil. Emirates Journal for Engineering Research 10(1) (2005) : 15-25.
- Asanachina, P. Microbial activities and nature of content in shallow groundwater at Ban Na Kob, Chom Thing District, Chiang Mai Province. International Symposium on Geology and Environment (1996).
- Boulding, R.. Practical handbook of soil, vadose zone, and ground-water contamination : assessment, prevention, and remediation. 2nd ed. Boca Raton, Fla : Lewis Publishers, 2004.
- Chu, et al. Aldicarb Transprot in Subsurface Environmental : Comparison of Models . Journal of Environmental Engineering 2006 : 121-129.
- Cindy, M.C., Lindsey, G., Fiona A.N., Hadrian F.C. and Augus J.B. Effect of drying and composting biosolids on the movement of nitrate and phosphate through repacked soil columns under steady-state hydrological conditions. PERGAMON 44(3) (2001) : 797-804.
- David, R.J., Bernard M.C. and Robert F.J. Column leaching of unretorted and retorted oil shales and claystone from the rundle deposit: water leaching. Pergamon Press plc 24(2) (1990) : 131-141.

- Davis, H.J. Fate and Transport Modeling of Selected Chlorinated Organic Compounds at Hangar 1000, U.S. Naval Air Station, Jacksonville, Florida. U.S. Geological Survey (03-4089) (2005) : 1-57.
- Debbie, W.D. and Dorothy F.P. Simulation of ground-water flow and nitrate transport in the upper floridan aquifer in the Southwestern Albany area, Georgia . Proceeding of the 2007 Georgia Water Resources Conference (3) (2007).
- Deutsch, W. J. Groundwater geochemistry : fundamentals and applications to contamination. Boca Raton, Fla : Lewis Publishers, 1997.
- Domenico, P. A. and W. Schwartz. Physical and chemical hydrogeology. Singapore : John Wiley & Sons, 1990.
- Fetter, C.W. Contaminant hydrogeology. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 1999.
- Fewtrell, L. Drinking-water nitrate, methemoglobinemia, and global burden of disease: a discussion. Environ. Health Perspect 112(10) (2004) : 1371-1374.
- Isabelle, D. and Josee, D. Column Leaching Test to Evaluate the Use of Alkaline Industrial Wastes to Neutralize Acid Mine Tailings. Journal of Environmental Engineering (2005).
- Jozef, M. Laboratory methods of estimating the retardation factor of migrating mineral nitrogen compounds in shallow groundwater. Geological Quarterly 47(1) (2003) : 91-96.
- Kazuya, I., Ikko, I., Akari Y. and Tsutomu T. Assessment of the Use of Hand Warmer for Nitrate Retardation in Porous Media. Jornal of Water and Environment Technology 8(4) (2010) : 355-362.
- Kowalenko, C.G., and Yu, S. Assessment of nitrate adsorption in soils by extraction, equilibration and column-leaching methods. Canadian journal of soil science (10) (1995) : 49-57.
- Lagrega, M.D., Phillip, L.B. and Jeffrey, C.E. Hazardous waste management. Boston, MA : McGraw-Hill, 2001.
- Larry, W.C. NITRATES in GROUNDWATER. Florida: CRC Press, 2000.

- Mark, L.B. et al. Partitioning Tracer Tests for Characterizing Immiscible-Fluid Saturations and Interfacial Areas in the Vadose Zone. Vadose Zone Journal (2003) : 138-147.
- Mcdonald, M. G., and Harbaugh, A. W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. USGS. (1998) : 1-596.
- Mikolajkow, J. Laboratory methods of estimating the retardation factor of migration mineral nitrogen compounds in shallow groundwater. Geological Quarterly 47(1) (2006) : 91-96.
- OCED/OCDE Guidelines for the testing of chemicals leaching in soil columns. 13 (4) (2004) : 1-15.
- Paul, W. and Jennifer, J. Nitrate removal in zero-valent iron packed columns. Water Research 37(10) (2003).
- Putthividhya, A., Abriola, L.M. and Kukor, J.J. Effects of Substrate Exposure History on the Transport and Attachment of TCE Degrading Toluene in Porous Media. General Meeting of the American Society for Microbiology (2004) : 0-104.
- Ramnarong, V. Groundwater resources in Mae Klong basin, Bangkok, Thailand. Department of Mineral Resources, Ministry of Industry, Thailand, 1993.
- Roger, J. Leaching column method for overburden analysis and prediction of weathering rates. ADTI-WP2 (2004).
- Ryan, M.C., Graham, G.R. and Rudolph, D.L. Contrasting Nitrate Adsorption in Andisols of Two Coffee Plantations in Costa Rica. J.ENVIRON.QUAL 30(9) (2001) : 1848-1852.
- Sabzali, A., Gholami, M., Yazdanbakhsh, A.R., Khodadadi, A., Musavi, B. and Mirzaee, R. Chemical Denitrification of Nitrate from Groundwater via sulfamic acid and zinc metal. Iran.J.Environ.Health.Dci.Eng 3(3) (2006) : 141-146.
- Schepers, J.S. and Raun, W.R. Nitrogen in Agricultural Systems. , 2008.
- Schwartz, F. W. and H. Zhang. Fundamentals of ground water. New York : John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- .Smith, Lawrence A. . In situ thermal technologies for site remediation. Boca Raton, Fla : Lewis Publishers, 1993.

- Stuart, M.E., Chilton, P.J., Newell, A.J., and Butcher, A.S. Nitrate concentrations in the Morestead borehole, Twyford. British Geological , 2008.
- Takashi, N. and Soroj, K.C. Sources of nitrogen contamination in groundwater deduced by nitrate isotopes in Kathmandu Valley, Nepal. International Symposium on Southeast Asia Water Environment 8(10) (2010) : 103-110.
- Tirado, R. Nitrate in Drinking Water in the Philippines and Thailand. Greenpeace Research Laboratories Technical Note 5(10) (2007).
- US. Geological Survey. Simulating Transport of Volatile Organic Compound in the Unsaturated Zone Using the Computer Model R-UNSAT. US. Geological Survey 1998.
- Wichterlova, J., Rod, V. and Hancil, V. Prediction of the Performance of an Extraction Column from Tracer Experiments with a Stationary Continuous Phase. Institute of Chemical Process Fundamentals 165(2) (1990).
- Zheng, C., and Jiao, J.J. Numerical Simulation of Tracer Test in Heterogeneous Aquifer. Journal of Environmental Engineering 1998 : 510-516.
- Zheng, C., and Wang, P . MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems. GMS 5.0 1999 : 1-205.
- Zheng, C. Applied contaminant transport modeling. 2nd ed. New York : Wiley-Interscience, 2002.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาขนาดเม็ดดินก่อนการทดลอง

การหาขนาดเม็ดดินก่อนการทดลองเป็นขั้นตอนที่สำคัญเนื่องจากการทดลองนี้เป็นการแบ่งชนิดของดินเพื่อใช้ในการทดลอง จำนวนชุดดินที่แบ่งได้มีผลต่อการออกแบบชุดการทดลองแต่ละชุดการทดลองรายละเอียดต่าง ๆ แสดงดังนี้

1. วิธีการหาขนาดของเม็ดดิน

1.1 วิธีใช้ตะแกรงร่อน

วิธีใช้ตะแกรงร่อนเหมาะสำหรับดินพวกเม็ดหยาบ เช่น กรวด ทราย เป็นต้นทดลองโดยการนำดินที่ต้องการหาขนาดใส่ลงในตะแกรงมาตรฐานแล้วเขย่า ตะแกรงที่ใช้ร่อนมีหลายขนาดจัดซ้อนกันเป็นชั้น ๆ โดยที่ตะแกรงขนาดใหญ่สุด (ตะแกรงเบอร์ 4 ขนาดช่องว่าง 4.760 มิลลิเมตร) อยู่ชั้นบนสุด และตะแกรงขนาดเล็กสุด (ตะแกรงเบอร์ 200 ขนาดช่องว่าง 0.075 มิลลิเมตร) อยู่ชั้นล่างสุด เมื่อร่อนดินและนำมาซึ่งสามารถคำนวณหาส่วนที่ค้างหรือผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ เป็นเปอร์เซ็นต์กับน้ำหนักทั้งหมดดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักของดินในแต่ละตะแกรง} \times 100}{\text{น้ำหนักของดินทั้งหมด}}$$

เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม = ผลบวกสะสมของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงที่ใหญ่กว่า

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรง (\%Passing)} = 100 - \text{เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม}$$

1.2 วิธีตกตะกอน

วิธีนี้เหมาะสำหรับดินพวกเม็ดละเอียด ซึ่งมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยนำดินที่ต้องการหาขนาดมาละลายน้ำแล้วใส่ลงในหลอดแก้ว ให้เม็ดดินแตกกระจายแขวนลอยอยู่ในน้ำ จากนั้นใช้ไฮโดรมิเตอร์วัดอัตราการตกตะกอนหรือวัดความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินที่ละลายแขวนลอยอยู่ในน้ำที่ความลึก h ในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยอาศัยกฎของสโตค (Stoke's Law) ซึ่งกล่าวว่าความเร็วของการตกตะกอนขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเม็ดดิน ความหนาแน่นของของเหลว ความหนืดของของเหลวและขนาดของเม็ดดิน กล่าวคือ ดินที่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนหรือจมได้เร็วกว่าดินที่มีขนาดเล็ก

2. การกระจายตัวของเม็ดดิน

เมื่อนำผลการทดสอบเพื่อหาขนาดของเม็ดดิน ทั้งในดินพวกเม็ดหยาบที่ได้จากวิธีร่อนด้วยตะแกรง และดินพวกเม็ดละเอียดที่ได้จากวิธีการตกตะกอน มาเขียนเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเม็ดดินกับจำนวนเปอร์เซ็นต์ของดินที่มีขนาดเล็กกว่าโดยน้ำหนักในกระดาษเซมิ - ล็อก จะได้เส้นกราฟกระจายตัวของเม็ดดินดังรูปที่ 3-4 และ รูปที่ 3-5



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S2

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	46.70	16.92	46.70	16.92	229.30	83.08
20	0.840	110.10	39.89	156.80	56.81	119.20	43.19
40	0.420	47.60	17.25	204.40	74.06	71.60	25.94
50	0.297	22.00	7.97	226.40	82.03	49.60	17.97
100	0.150	30.00	10.87	256.40	92.90	19.60	7.10
200	0.075	10.40	3.77	266.80	96.67	9.20	3.33
Pan	< 0.075	9.20	3.33	276.00	100.00		
รวม		276	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	59.40	21.51	59.40	21.51	216.80	78.49
20	0.840	117.90	42.69	177.30	64.19	98.90	35.81
40	0.420	38.80	14.05	216.10	78.24	60.10	21.76
50	0.297	18.20	6.59	234.30	84.83	41.90	15.17
100	0.150	22.80	8.25	257.10	93.08	19.10	6.92
200	0.075	11.30	4.09	268.40	97.18	7.80	2.82
Pan	< 0.075	7.80	2.82	276.20	100.00		
รวม		276.2	100.00				

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S2 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	54.90	19.87	54.90	19.87	221.40	80.13
20	0.840	113.30	41.01	168.20	60.88	108.10	39.12
40	0.420	45.10	16.32	213.30	77.20	63.00	22.80
50	0.297	19.30	6.99	232.60	84.18	43.70	15.82
100	0.150	25.50	9.23	258.10	93.41	18.20	6.59
200	0.075	10.00	3.62	268.10	97.03	8.20	2.97
Pan	< 0.075	8.20	2.97	276.30	100.00		
รวม		276.3	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S2

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	4.760	83.08	78.49	80.13	80.57
20	0.840	43.19	35.81	39.12	39.37
40	0.420	25.94	21.76	22.80	23.50
50	0.297	17.97	15.17	15.82	16.32
100	0.150	7.10	6.92	6.59	6.87
200	0.075	3.33	2.82	2.97	3.04

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S3

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	50.10	18.28	50.10	18.28	223.90	81.72
20	0.840	180.80	65.99	230.90	84.27	43.10	15.73
40	0.420	24.60	8.98	255.50	93.25	18.50	6.75
50	0.297	6.10	2.23	261.60	95.47	12.40	4.53
100	0.150	5.30	1.93	266.90	97.41	7.10	2.59
200	0.075	3.00	1.09	269.90	98.50	4.10	1.50
Pan	< 0.075	4.10	1.50	274.00	100.00		
รวม		274	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	91.20	33.72	91.20	33.72	179.30	66.28
20	0.840	152.80	56.49	244.00	90.20	26.50	9.80
40	0.420	14.10	5.21	258.10	95.42	12.40	4.58
50	0.297	3.50	1.29	261.60	96.71	8.90	3.29
100	0.150	3.80	1.40	265.40	98.11	5.10	1.89
200	0.075	2.40	0.89	267.80	99.00	2.70	1.00
Pan	< 0.075	2.70	1.00	270.50	100.00		
รวม		270.5	100.00				

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S3 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	65.80	24.31	65.80	24.31	204.90	75.69
20	0.840	162.00	59.84	227.80	84.15	42.90	15.85
40	0.420	22.90	8.46	250.70	92.61	20.00	7.39
50	0.297	6.10	2.25	256.80	94.87	13.90	5.13
100	0.150	6.30	2.33	263.10	97.19	7.60	2.81
200	0.075	3.30	1.22	266.40	98.41	4.30	1.59
Pan	< 0.075	4.30	1.59	270.70	100.00		
รวม		270.7	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S3

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	4.760	81.72	66.28	75.69	74.56
20	0.840	15.73	9.80	15.85	13.79
40	0.420	6.75	4.58	7.39	6.24
50	0.297	4.53	3.29	5.13	4.32
100	0.150	2.59	1.89	2.81	2.43
200	0.075	1.50	1.00	1.59	1.36

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S4

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	49.10	17.95	49.10	17.95	224.50	82.05
20	0.840	174.80	63.89	223.90	81.83	49.70	18.17
40	0.420	26.60	9.72	250.50	91.56	23.10	8.44
50	0.297	8.10	2.96	258.60	94.52	15.00	5.48
100	0.150	7.30	2.67	265.90	97.19	7.70	2.81
200	0.075	3.30	1.21	269.20	98.39	4.40	1.61
Pan	< 0.075	4.40	1.61	273.60	100.00		
รวม		273.6	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	50.20	18.32	50.20	18.32	223.80	81.68
20	0.840	175.30	63.98	225.50	82.30	48.50	17.70
40	0.420	26.20	9.56	251.70	91.86	22.30	8.14
50	0.297	8.20	2.99	259.90	94.85	14.10	5.15
100	0.150	7.10	2.59	267.00	97.45	7.00	2.55
200	0.075	3.60	1.31	270.60	98.76	3.40	1.24
Pan	< 0.075	3.40	1.24	274.00	100.00		
รวม		274	100.00				

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S4 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	49.10	18.18	49.10	18.18	221.00	81.82
20	0.840	169.80	62.87	218.90	81.04	51.20	18.96
40	0.420	28.60	10.59	247.50	91.63	22.60	8.37
50	0.297	7.70	2.85	255.20	94.48	14.90	5.52
100	0.150	7.80	2.89	263.00	97.37	7.10	2.63
200	0.075	3.70	1.37	266.70	98.74	3.40	1.26
Pan	< 0.075	3.40	1.26	270.10	100.00		
รวม		270.1	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S4

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	4.760	82.05	81.68	81.82	81.85
20	0.840	18.17	17.70	18.96	18.27
40	0.420	8.44	8.14	8.37	8.32
50	0.297	5.48	5.15	5.52	5.38
100	0.150	2.81	2.55	2.63	2.67
200	0.075	1.61	1.24	1.26	1.37

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S5

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	1.40	0.47	1.40	0.47	298.90	99.53
20	0.840	40.90	13.62	42.30	14.09	258.00	85.91
40	0.420	42.10	14.02	84.40	28.11	215.90	71.89
50	0.297	27.40	9.12	111.80	37.23	188.50	62.77
100	0.150	62.00	20.65	173.80	57.88	126.50	42.12
200	0.075	48.90	16.28	222.70	74.16	77.60	25.84
Pan	< 0.075	77.60	25.84	300.30	100.00		
รวม		300.3	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.80	0.27	0.80	0.27	299.60	99.73
20	0.840	39.50	13.15	40.30	13.42	260.10	86.58
40	0.420	42.60	14.18	82.90	27.60	217.50	72.40
50	0.297	26.50	8.82	109.40	36.42	191.00	63.58
100	0.150	59.20	19.71	168.60	56.13	131.80	43.87
200	0.075	46.90	15.61	215.50	71.74	84.90	28.26
Pan	< 0.075	84.90	28.26	300.40	100.00		
รวม		300.4	100.00				

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S5 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.40	0.13	0.40	0.13	298.70	99.87
20	0.840	27.60	9.23	28.00	9.36	271.10	90.64
40	0.420	39.00	13.04	67.00	22.40	232.10	77.60
50	0.297	26.20	8.76	93.20	31.16	205.90	68.84
100	0.150	58.60	19.59	151.80	50.75	147.30	49.25
200	0.075	50.20	16.78	202.00	67.54	97.10	32.46
Pan	< 0.075	97.10	32.46	299.10	100.00		
รวม		299.1	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S5

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
4	4.760	99.53	99.73	99.87	99.71
20	0.840	85.91	86.58	90.64	87.71
40	0.420	71.89	72.40	77.60	73.97
50	0.297	62.77	63.58	68.84	65.06
100	0.150	42.12	43.87	49.25	45.08
200	0.075	25.84	28.26	32.46	28.86

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S8

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	7.00	2.32	7.00	2.32	294.30	97.68
20	0.840	118.40	39.30	125.40	41.62	175.90	58.38
40	0.420	64.10	21.27	189.50	62.89	111.80	37.11
50	0.297	28.90	9.59	218.40	72.49	82.90	27.51
100	0.150	36.40	12.08	254.80	84.57	46.50	15.43
200	0.075	19.20	6.37	274.00	90.94	27.30	9.06
Pan	< 0.075	27.30	9.06	301.30	100.00		
รวม		301.3	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	4.50	1.49	4.50	1.49	297.20	98.51
20	0.840	122.20	40.50	126.70	42.00	175.00	58.00
40	0.420	65.30	21.64	192.00	63.64	109.70	36.36
50	0.297	27.80	9.21	219.80	72.85	81.90	27.15
100	0.150	34.50	11.44	254.30	84.29	47.40	15.71
200	0.075	18.70	6.20	273.00	90.49	28.70	9.51
Pan	< 0.075	28.70	9.51	301.70	100.00		
รวม		301.7	100.00				

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S8 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	1.40	0.68	1.40	0.68	205.60	99.32
20	0.840	80.10	38.70	81.50	39.37	125.50	60.63
40	0.420	47.00	22.71	128.50	62.08	78.50	37.92
50	0.297	20.40	9.86	148.90	71.93	58.10	28.07
100	0.150	24.40	11.79	173.30	83.72	33.70	16.28
200	0.075	13.80	6.67	187.10	90.39	19.90	9.61
Pan	< 0.075	19.90	9.61	207.00	100.00		
รวม		207	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S8

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
4	4.760	97.68	98.51	99.32	98.50
20	0.840	58.38	58.00	60.63	59.00
40	0.420	37.11	36.36	37.92	37.13
50	0.297	27.51	27.15	28.07	27.58
100	0.150	15.43	15.71	16.28	15.81
200	0.075	9.06	9.51	9.61	9.40

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S9

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	2.80	1.09	2.80	1.09	254.50	98.91
20	0.840	86.00	33.42	88.80	34.51	168.50	65.49
40	0.420	72.20	28.06	161.00	62.57	96.30	37.43
50	0.297	32.30	12.55	193.30	75.13	64.00	24.87
100	0.150	35.90	13.95	229.20	89.08	28.10	10.92
200	0.075	20.70	8.05	249.90	97.12	7.40	2.88
Pan	< 0.075	7.40	2.88	257.30	100.00		
รวม		257.3	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	4.60	1.74	4.60	1.74	260.50	98.26
20	0.840	96.10	36.25	100.70	37.99	164.40	62.01
40	0.420	74.90	28.25	175.60	66.24	89.50	33.76
50	0.297	27.60	10.41	203.20	76.65	61.90	23.35
100	0.150	33.70	12.71	236.90	89.36	28.20	10.64
200	0.075	15.70	5.92	252.60	95.28	12.50	4.72
Pan	< 0.075	12.50	4.72	265.10	100.00		
รวม		265.1	100.00				

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S9 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	3.00	1.17	3.00	1.17	253.50	98.83
20	0.840	94.20	36.73	97.20	37.89	159.30	62.11
40	0.420	60.10	23.43	157.30	61.33	99.20	38.67
50	0.297	27.20	10.60	184.50	71.93	72.00	28.07
100	0.150	39.20	15.28	223.70	87.21	32.80	12.79
200	0.075	19.00	7.41	242.70	94.62	13.80	5.38
Pan	< 0.075	13.80	5.38	256.50	100.00		
รวม		256.5	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S9

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	4.760	98.91	98.26	98.83	98.67
20	0.840	65.49	62.01	62.11	63.20
40	0.420	37.43	33.76	38.67	36.62
50	0.297	24.87	23.35	28.07	25.43
100	0.150	10.92	10.64	12.79	11.45
200	0.075	2.88	4.72	5.38	4.32

ตารางที่ ก-7 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S14

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	10.10	3.35	10.10	3.35	291.40	96.65
20	0.840	103.70	34.39	113.80	37.74	187.70	62.26
40	0.420	70.80	23.48	184.60	61.23	116.90	38.77
50	0.297	32.60	10.81	217.20	72.04	84.30	27.96
100	0.150	40.00	13.27	257.20	85.31	44.30	14.69
200	0.075	22.30	7.40	279.50	92.70	22.00	7.30
Pan	< 0.075	22.00	7.30	301.50	100.00		
รวม		301.5	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	10.40	3.47	10.40	3.47	289.70	96.53
20	0.840	116.70	38.89	127.10	42.35	173.00	57.65
40	0.420	72.20	24.06	199.30	66.41	100.80	33.59
50	0.297	33.00	11.00	232.30	77.41	67.80	22.59
100	0.150	30.10	10.03	262.40	87.44	37.70	12.56
200	0.075	20.90	6.96	283.30	94.40	16.80	5.60
Pan	< 0.075	16.80	5.60	300.10	100.00		
รวม		300.1	100.00				

ตารางที่ ก-7 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S14 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	9.40	3.12	9.40	3.12	292.10	96.88
20	0.840	100.60	33.37	110.00	36.48	191.50	63.52
40	0.420	67.70	22.45	177.70	58.94	123.80	41.06
50	0.297	32.20	10.68	209.90	69.62	91.60	30.38
100	0.150	43.30	14.36	253.20	83.98	48.30	16.02
200	0.075	24.30	8.06	277.50	92.04	24.00	7.96
Pan	< 0.075	24.00	7.96	301.50	100.00		
รวม		301.5	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S14

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	4.760	96.65	96.53	96.88	96.69
20	0.840	62.26	57.65	63.52	61.14
40	0.420	38.77	33.59	41.06	37.81
50	0.297	27.96	22.59	30.38	26.98
100	0.150	14.69	12.56	16.02	14.43
200	0.075	7.30	5.60	7.96	6.95

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S7

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.30	0.10	0.30	0.10	296.10	99.90
20	0.840	93.40	31.51	93.70	31.61	202.70	68.39
40	0.420	68.50	23.11	162.20	54.72	134.20	45.28
50	0.297	31.30	10.56	193.50	65.28	102.90	34.72
100	0.150	39.40	13.29	232.90	78.58	63.50	21.42
200	0.075	27.60	9.31	260.50	87.89	35.90	12.11
Pan	< 0.075	35.90	12.11	296.40	100.00		
รวม		296.4	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.50	0.17	0.50	0.17	299.10	99.83
20	0.840	99.90	33.34	100.40	33.51	199.20	66.49
40	0.420	70.70	23.60	171.10	57.11	128.50	42.89
50	0.297	31.60	10.55	202.70	67.66	96.90	32.34
100	0.150	38.40	12.82	241.10	80.47	58.50	19.53
200	0.075	24.40	8.14	265.50	88.62	34.10	11.38
Pan	< 0.075	34.10	11.38	299.60	100.00		
รวม		299.6	100.00				

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S7 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.20	0.10	0.20	0.10	202.80	99.90
20	0.840	80.70	39.75	80.90	39.85	122.10	60.15
40	0.420	41.60	20.49	122.50	60.34	80.50	39.66
50	0.297	17.20	8.47	139.70	68.82	63.30	31.18
100	0.150	22.40	11.03	162.10	79.85	40.90	20.15
200	0.075	17.40	8.57	179.50	88.42	23.50	11.58
Pan	< 0.075	23.50	11.58	203.00	100.00		
รวม		203	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S7

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	4.760	99.90	99.83	99.90	99.88
20	0.840	68.39	66.49	60.15	65.01
40	0.420	45.28	42.89	39.66	42.61
50	0.297	34.72	32.34	31.18	32.75
100	0.150	21.42	19.53	20.15	20.37
200	0.075	12.11	11.38	11.58	11.69

ตารางที่ ก-9 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S10

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	1.60	0.53	1.60	0.53	297.70	99.47
20	0.840	104.70	34.98	106.30	35.52	193.00	64.48
40	0.420	47.60	15.90	153.90	51.42	145.40	48.58
50	0.297	22.40	7.48	176.30	58.90	123.00	41.10
100	0.150	37.20	12.43	213.50	71.33	85.80	28.67
200	0.075	33.20	11.09	246.70	82.43	52.60	17.57
Pan	< 0.075	52.60	17.57	299.30	100.00		
รวม		299.3	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.80	0.27	0.80	0.27	297.80	99.73
20	0.840	115.70	38.75	116.50	39.02	182.10	60.98
40	0.420	49.00	16.41	165.50	55.43	133.10	44.57
50	0.297	21.10	7.07	186.60	62.49	112.00	37.51
100	0.150	33.90	11.35	220.50	73.84	78.10	26.16
200	0.075	31.70	10.62	252.20	84.46	46.40	15.54
Pan	< 0.075	46.40	15.54	298.60	100.00		
รวม		298.6	100.00				

ตารางที่ ก-9 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S10 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.60	0.20	0.60	0.20	298.10	99.80
20	0.840	108.40	36.29	109.00	36.49	189.70	63.51
40	0.420	46.70	15.63	155.70	52.13	143.00	47.87
50	0.297	21.40	7.16	177.10	59.29	121.60	40.71
100	0.150	36.70	12.29	213.80	71.58	84.90	28.42
200	0.075	41.40	13.86	255.20	85.44	43.50	14.56
Pan	< 0.075	43.50	14.56	298.70	100.00		
รวม		298.7	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S10

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
4	4.760	99.47	99.73	99.80	99.67
20	0.840	64.48	60.98	63.51	62.99
40	0.420	48.58	44.57	47.87	47.01
50	0.297	41.10	37.51	40.71	39.77
100	0.150	28.67	26.16	28.42	27.75
200	0.075	17.57	15.54	14.56	15.89

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S11

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	1.50	0.50	1.50	0.50	299.70	99.50
20	0.840	120.70	40.07	122.20	40.57	179.00	59.43
40	0.420	60.00	19.92	182.20	60.49	119.00	39.51
50	0.297	26.30	8.73	208.50	69.22	92.70	30.78
100	0.150	37.00	12.28	245.50	81.51	55.70	18.49
200	0.075	23.90	7.93	269.40	89.44	31.80	10.56
Pan	< 0.075	31.80	10.56	301.20	100.00		
รวม		301.2	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	2.80	0.93	2.80	0.93	299.70	99.07
20	0.840	137.80	45.55	140.60	46.48	161.90	53.52
40	0.420	57.40	18.98	198.00	65.45	104.50	34.55
50	0.297	23.90	7.90	221.90	73.36	80.60	26.64
100	0.150	31.70	10.48	253.60	83.83	48.90	16.17
200	0.075	22.70	7.50	276.30	91.34	26.20	8.66
Pan	< 0.075	26.20	8.66	302.50	100.00		
รวม		302.5	100.00				

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S11 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	1.70	0.56	1.70	0.56	300.50	99.44
20	0.840	131.50	43.51	133.20	44.08	169.00	55.92
40	0.420	57.90	19.16	191.10	63.24	111.10	36.76
50	0.297	25.20	8.34	216.30	71.58	85.90	28.42
100	0.150	33.30	11.02	249.60	82.59	52.60	17.41
200	0.075	22.00	7.28	271.60	89.87	30.60	10.13
Pan	< 0.075	30.60	10.13	302.20	100.00		
รวม		302.2	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S11

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
4	4.760	99.50	99.07	99.44	99.34
20	0.840	59.43	53.52	55.92	56.29
40	0.420	39.51	34.55	36.76	36.94
50	0.297	30.78	26.64	28.42	28.62
100	0.150	18.49	16.17	17.41	17.35
200	0.075	10.56	8.66	10.13	9.78

ตารางที่ ก-11 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S13

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.80	0.27	0.80	0.27	298.80	99.73
20	0.840	118.40	39.52	119.20	39.79	180.40	60.21
40	0.420	63.40	21.16	182.60	60.95	117.00	39.05
50	0.297	26.50	8.85	209.10	69.79	90.50	30.21
100	0.150	34.40	11.48	243.50	81.28	56.10	18.72
200	0.075	22.60	7.54	266.10	88.82	33.50	11.18
Pan	< 0.075	33.50	11.18	299.60	100.00		
รวม		299.6	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	1.20	0.40	1.20	0.40	298.50	99.60
20	0.840	121.80	40.64	123.00	41.04	176.70	58.96
40	0.420	61.90	20.65	184.90	61.70	114.80	38.30
50	0.297	25.50	8.51	210.40	70.20	89.30	29.80
100	0.150	33.40	11.14	243.80	81.35	55.90	18.65
200	0.075	21.10	7.04	264.90	88.39	34.80	11.61
Pan	< 0.075	34.80	11.61	299.70	100.00		
รวม		299.7	100.00				

ตารางที่ ก-11 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S13 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.90	0.30	0.90	0.30	298.70	99.70
20	0.840	129.30	43.16	130.20	43.46	169.40	56.54
40	0.420	61.70	20.59	191.90	64.05	107.70	35.95
50	0.297	24.40	8.14	216.30	72.20	83.30	27.80
100	0.150	31.90	10.65	248.20	82.84	51.40	17.16
200	0.075	19.50	6.51	267.70	89.35	31.90	10.65
Pan	< 0.075	31.90	10.65	299.60	100.00		
รวม		299.6	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง S13

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
4	4.760	99.73	99.60	99.70	99.68
20	0.840	60.21	58.96	56.54	58.57
40	0.420	39.05	38.30	35.95	37.77
50	0.297	30.21	29.80	27.80	29.27
100	0.150	18.72	18.65	17.16	18.18
200	0.075	11.18	11.61	10.65	11.15

ตารางที่ ก-12 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง T1

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	6.00	2.00	6.00	2.00	294.20	98.00
20	0.840	124.60	41.51	130.60	43.50	169.60	56.50
40	0.420	59.00	19.65	189.60	63.16	110.60	36.84
50	0.297	23.00	7.66	212.60	70.82	87.60	29.18
100	0.150	30.00	9.99	242.60	80.81	57.60	19.19
200	0.075	28.40	9.46	271.00	90.27	29.20	9.73
Pan	< 0.075	29.20	9.73	300.20	100.00		
รวม		300.2	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	4.20	1.40	4.20	1.40	296.10	98.60
20	0.840	148.10	49.32	152.30	50.72	148.00	49.28
40	0.420	51.90	17.28	204.20	68.00	96.10	32.00
50	0.297	18.30	6.09	222.50	74.09	77.80	25.91
100	0.150	25.70	8.56	248.20	82.65	52.10	17.35
200	0.075	26.10	8.69	274.30	91.34	26.00	8.66
Pan	< 0.075	26.00	8.66	300.30	100.00		
รวม		300.3	100.00				

ตารางที่ ก-12 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง T1 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	7.80	2.62	7.80	2.62	289.40	97.38
20	0.840	159.70	53.73	167.50	56.36	129.70	43.64
40	0.420	46.50	15.65	214.00	72.01	83.20	27.99
50	0.297	16.70	5.62	230.70	77.62	66.50	22.38
100	0.150	19.20	6.46	249.90	84.08	47.30	15.92
200	0.075	21.40	7.20	271.30	91.29	25.90	8.71
Pan	< 0.075	25.90	8.71	297.20	100.00		
รวม		297.2	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง T1

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
4	4.760	98.00	98.60	97.38	97.99
20	0.840	56.50	49.28	43.64	49.81
40	0.420	36.84	32.00	27.99	32.28
50	0.297	29.18	25.91	22.38	25.82
100	0.150	19.19	17.35	15.92	17.48
200	0.075	9.73	8.66	8.71	9.03

ตารางที่ ก-13 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง T2

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.90	0.30	0.90	0.30	301.60	99.70
20	0.840	147.60	48.79	148.50	49.09	154.00	50.91
40	0.420	59.60	19.70	208.10	68.79	94.40	31.21
50	0.297	21.80	7.21	229.90	76.00	72.60	24.00
100	0.150	28.00	9.26	257.90	85.26	44.60	14.74
200	0.075	21.20	7.01	279.10	92.26	23.40	7.74
Pan	< 0.075	23.40	7.74	302.50	100.00		
รวม		302.5	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะผสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.30	0.10	0.30	0.10	299.60	99.90
20	0.840	138.10	46.05	138.40	46.15	161.50	53.85
40	0.420	57.90	19.31	196.30	65.46	103.60	34.54
50	0.297	22.60	7.54	218.90	72.99	81.00	27.01
100	0.150	31.00	10.34	249.90	83.33	50.00	16.67
200	0.075	23.30	7.77	273.20	91.10	26.70	8.90
Pan	< 0.075	26.70	8.90	299.90	100.00		

ตารางที่ ก-13 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง T2 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลวด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.60	0.20	0.60	0.20	299.60	99.80
20	0.840	170.30	56.73	170.90	56.93	129.30	43.07
40	0.420	52.50	17.49	223.40	74.42	76.80	25.58
50	0.297	17.70	5.90	241.10	80.31	59.10	19.69
100	0.150	22.00	7.33	263.10	87.64	37.10	12.36
200	0.075	16.50	5.50	279.60	93.14	20.60	6.86
Pan	< 0.075	20.60	6.86	300.20	100.00		
รวม		300.2	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง T2

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลวด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	4.760	99.70	99.90	99.80	99.80
20	0.840	50.91	53.85	43.07	49.28
40	0.420	31.21	34.54	25.58	30.44
50	0.297	24.00	27.01	19.69	23.57
100	0.150	14.74	16.67	12.36	14.59
200	0.075	7.74	8.90	6.86	7.83

ตารางที่ ก-14 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง T3

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 1

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะสอด		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	0.80	0.27	0.80	0.27	298.70	99.73
20	0.840	91.70	30.62	92.50	30.88	207.00	69.12
40	0.420	64.40	21.50	156.90	52.39	142.60	47.61
50	0.297	31.60	10.55	188.50	62.94	111.00	37.06
100	0.150	44.00	14.69	232.50	77.63	67.00	22.37
200	0.075	26.90	8.98	259.40	86.61	40.10	13.39
Pan	< 0.075	40.10	13.39	299.50	100.00		
รวม		299.5	100.00				

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 2

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างตะสอด		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	1.30	0.43	1.30	0.43	297.90	99.57
20	0.840	100.60	33.62	101.90	34.06	197.30	65.94
40	0.420	65.20	21.79	167.10	55.85	132.10	44.15
50	0.297	30.40	10.16	197.50	66.01	101.70	33.99
100	0.150	39.40	13.17	236.90	79.18	62.30	20.82
200	0.075	24.10	8.05	261.00	87.23	38.20	12.77
Pan	< 0.075	38.20	12.77	299.20	100.00		
รวม		299.2	100.00				

ตารางที่ ก-14 ข้อมูลขนาดของเม็ดดินของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง T3 (ต่อ)

การหาขนาดของเม็ดดินครั้งที่ 3

US Standard sieve No.	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินค้างตะแกรง		น้ำหนักดินค้างสะสม		น้ำหนักดินผ่านตะแกรง	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
4	4.760	3.50	1.17	3.50	1.17	295.70	98.83
20	0.840	104.10	34.79	107.60	35.96	191.60	64.04
40	0.420	65.20	21.79	172.80	57.75	126.40	42.25
50	0.297	30.30	10.13	203.10	67.88	96.10	32.12
100	0.150	39.20	13.10	242.30	80.98	56.90	19.02
200	0.075	22.30	7.45	264.60	88.44	34.60	11.56
Pan	< 0.075	34.60	11.56	299.20	100.00		
รวม		299.2	100.00				

การหาขนาดเม็ดดินเฉลี่ยของดินตำแหน่งเก็บตัวอย่าง T3

น้ำหนักดินผ่าน ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องลอด (mm)	น้ำหนักดินผ่านตะแกรง (%)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	4.760	99.73	99.57	98.83	99.38
20	0.840	69.12	65.94	64.04	66.37
40	0.420	47.61	44.15	42.25	44.67
50	0.297	37.06	33.99	32.12	34.39
100	0.150	22.37	20.82	19.02	20.74
200	0.075	13.39	12.77	11.56	12.57



ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อน

การคำนวณหาค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนคำนวณได้ดังสมการที่ ข-1

$$\text{Mean Residence Time} = \frac{\int_0^{\infty} C(t)tdt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (\text{ข-1})$$

เมื่อ

$C(t)$ คือ ความเข้มข้นของเทอร์เซอร์หรือสารปนเปื้อนในน้ำออก ณ เวลา t (มิลลิกรัมต่อลิตร)

t คือ เวลาภายหลังการนำเข้าสู่สารเทอร์เซอร์ (นาที)

การคำนวณหาค่าเวลาเฉลี่ยในการเดินทางของสารปนเปื้อนใช้สมการที่ ข-1 คำนวณทั้งเทอร์เซอร์และไนเตรท (ภาคผนวก ค) ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 1 (ดินตัวอย่าง S2) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.260	6.23	0.81	3.12	2.52
6.23	0.2	55.9	0.027	0.004	0.260	1.281	6.23	3.99	9.35	37.29
12.46	0.4	219.3	0.104	0.017	1.021	4.732	6.23	14.74	15.58	229.58
18.69	0.6	797.4	0.378	0.064	3.711	11.098	6.23	34.57	21.81	753.79
24.92	0.8	1,587.0	0.752	0.126	7.386	16.639	6.23	51.83	28.04	1,453.09
31.15	1.0	1,988.0	0.943	0.158	9.253	18.929	6.23	58.96	34.27	2,020.42
37.38	1.2	2,079.0	0.986	0.166	9.676	19.390	6.23	60.40	40.50	2,445.89
43.61	1.4	2,087.0	0.990	0.166	9.714	19.478	6.23	60.68	46.73	2,835.06
49.84	1.6	2,098.0	0.995	0.167	9.765	19.548	6.23	60.89	52.96	3,224.58
56.07	1.8	2,102.0	0.997	0.167	9.783	19.576	6.23	60.98	59.19	3,609.09
62.3	2.0	2,104.0	0.998	0.168	9.793	19.590	6.23	61.02	65.42	3,991.84
68.53	2.2	2,105.0	0.998	0.168	9.797	19.590	6.23	61.02	71.65	4,372.02
74.76	2.4	2,104.0	0.998	0.168	9.793	19.595	6.23	61.04	77.88	4,753.32
80.99	2.6	2,106.0	0.999	0.168	9.802	19.595	6.23	61.04	84.11	5,133.59
87.22	2.8	2,104.0	0.998	0.168	9.793	19.181	6.23	59.75	90.34	5,397.29
93.45	3.0	2,017.0	0.956	0.161	9.388	16.979	6.23	52.89	96.57	5,107.30
99.68	3.2	1,631.0	0.773	0.130	7.591	12.660	6.23	39.44	102.80	4,053.76
105.91	3.4	1,089.0	0.516	0.087	5.069	8.657	6.23	26.97	109.03	2,940.06
112.1	3.6	771.0	0.366	0.061	3.589	5.483	6.23	17.08	115.26	1,968.44
118.37	3.8	407.0	0.193	0.032	1.894	2.830	6.23	8.81	121.49	1,070.89
124.6	4.0	201.0	0.095	0.016	0.936	1.610	6.23	5.02	127.72	640.67

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 1 (ดินตัวอย่าง S2) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
130.83	4.2	145.0	0.069	0.012	0.675	1.173	6.23	3.65	133.95	489.38
137.1	4.4	107.0	0.051	0.009	0.498	0.922	6.23	2.87	140.18	402.80
143.29	4.6	91.2	0.043	0.007	0.424	0.773	6.23	2.41	146.41	352.36
149.5	4.8	74.8	0.035	0.006	0.348	0.652	6.23	2.03	152.64	310.03
155.75	5.0	65.3	0.031	0.005	0.304					
sum area = 900.20			sum area moment = 57,595.06			mean residence time = 63.98				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 1 (ดินตัวอย่าง S2) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.348	4.20	0.73	2.10	1.53
4.20	0.2	74.7	0.035	0.006	0.348	1.451	4.20	3.05	6.30	19.19
8.40	0.4	237.0	0.112	0.019	1.103	5.180	4.20	10.88	10.50	114.23
12.60	0.6	876.0	0.415	0.070	4.077	12.022	4.20	25.25	14.70	371.12
16.80	0.8	1,707.0	0.809	0.136	7.945	17.305	4.20	36.34	18.90	686.83
21.00	1.0	2,011.0	0.954	0.160	9.360	19.097	4.20	40.10	23.10	926.39
25.20	1.2	2,092.0	0.992	0.167	9.737	19.530	4.20	41.01	27.30	1,119.63
29.40	1.4	2,104.0	0.998	0.168	9.793	19.590	4.20	41.14	31.50	1,295.89
33.60	1.6	2,105.0	0.998	0.168	9.797	19.590	4.20	41.14	35.70	1,468.67
37.80	1.8	2,104.0	0.998	0.168	9.793	19.576	4.20	41.11	39.90	1,640.29
42.00	2.0	2,102.0	0.997	0.167	9.783	19.595	4.20	41.15	44.10	1,814.68
46.20	2.2	2,108.0	1.000	0.168	9.811	19.604	4.20	41.17	48.30	1,988.45
50.40	2.4	2,104.0	0.998	0.168	9.793	19.595	4.20	41.15	52.50	2,160.33
54.60	2.6	2,106.0	0.999	0.168	9.802	19.585	4.20	41.13	56.70	2,332.05
58.80	2.8	2,102.0	0.997	0.167	9.783	19.148	4.20	40.21	60.90	2,448.84
63.00	3.0	2,012.0	0.954	0.160	9.365	16.448	4.20	34.54	65.10	2,248.67
67.20	3.2	1,522.0	0.722	0.121	7.084	11.561	4.20	24.28	69.30	1,682.53
71.40	3.4	962.0	0.456	0.077	4.477	7.047	4.20	14.80	73.50	1,087.66
75.60	3.6	552.0	0.262	0.044	2.569	4.324	4.20	9.08	77.70	705.53
79.80	3.8	377.0	0.179	0.030	1.755	2.588	4.20	5.43	81.90	445.08
84.00	4.0	179.0	0.085	0.014	0.833	1.434	4.20	3.01	86.10	259.20

ตารางที่ ข-2 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 1 (ดินตัวอย่าง S2) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
88.20	4.2	129.0	0.061	0.010	0.600	1.075	4.20	2.26	90.30	203.88
92.40	4.4	102.0	0.048	0.008	0.475	0.857	4.20	1.80	94.50	170.04
96.60	4.6	82.1	0.039	0.007	0.382	0.709	4.20	1.49	98.70	146.92
100.80	4.8	70.2	0.033	0.006	0.327	0.612	4.20	1.29	102.90	132.26
105.00	5.0	61.3	0.029	0.005	0.285					
sum area = 583.53			sum area moment = 25,469.88			mean residence time = 43.65				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 2 (ดินตัวอย่าง S3) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.057	6.04	0.17	3.02	0.52
6.04	0.2	12.3	0.044	0.001	0.057	0.242	6.04	0.73	9.06	6.61
12.08	0.4	39.6	0.141	0.003	0.184	0.509	6.04	1.54	15.10	23.20
18.12	0.6	69.7	0.248	0.006	0.324	1.241	6.04	3.75	21.14	79.25
24.16	0.8	197.0	0.701	0.016	0.917	2.146	6.04	6.48	27.18	176.12
30.20	1.0	264.0	0.940	0.021	1.229	2.527	6.04	7.63	33.22	253.55
36.24	1.2	279.0	0.993	0.022	1.299	2.602	6.04	7.86	39.26	308.48
42.28	1.4	280.0	0.996	0.022	1.303	2.611	6.04	7.89	45.30	357.21
48.32	1.6	281.0	1.000	0.022	1.308	2.616	6.04	7.90	51.34	405.56
54.36	1.8	281.0	1.000	0.022	1.308	2.611	6.04	7.89	57.38	452.47
60.4	2.0	280.0	0.996	0.022	1.303	2.606	6.04	7.87	63.42	499.21
66.44	2.2	280.0	0.996	0.022	1.303	2.518	6.04	7.60	69.46	528.20
72.48	2.4	261.0	0.929	0.021	1.215	1.829	6.04	5.52	75.50	417.07
78.52	2.6	132.0	0.470	0.011	0.614	1.071	6.04	3.23	81.54	263.61
84.56	2.8	98.0	0.349	0.008	0.456	0.675	6.04	2.04	87.58	178.50
90.60	3.0	47.0	0.167	0.004	0.219	0.380	6.04	1.15	93.62	107.38
96.64	3.2	34.6	0.123	0.003	0.161	0.262	6.04	0.79	99.66	78.87
102.68	3.4	21.7	0.077	0.002	0.101	0.186	6.04	0.56	105.70	59.43
108.7	3.6	18.3	0.065	0.001	0.085	0.151	6.04	0.46	111.74	50.89
114.76	3.8	14.1	0.050	0.001	0.066	0.130	6.04	0.39	117.78	46.35
120.8	4.0	13.9	0.049	0.001	0.065	0.126	6.04	0.38	123.82	47.17

ตารางที่ ข-3 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 2 (ดินตัวอย่าง S3) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
126.84	4.2	13.2	0.047	0.001	0.061	0.121	6.04	0.37	129.86	47.46
132.9	4.4	12.8	0.046	0.001	0.060	0.119	6.04	0.36	135.90	48.71
138.92	4.6	12.7	0.045	0.001	0.059	0.117	6.04	0.35	141.94	50.28
145	4.8	12.5	0.044	0.001	0.058	0.115	6.04	0.35	147.98	51.38
151.00	5.0	12.2	0.043	0.001	0.057					
sum area = 83.25			sum area moment = 4,537.47			mean residence time =54.50				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 2 (ดินตัวอย่าง S3) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.057	4.03	0.11	2.02	0.23
4.03	0.2	12.2	0.043	0.001	0.057	0.334	4.03	0.67	6.05	4.07
8.06	0.4	59.6	0.212	0.005	0.277	1.138	4.03	2.29	10.08	23.11
12.09	0.6	185.0	0.658	0.015	0.861	2.099	4.03	4.23	14.11	59.66
16.12	0.8	266.0	0.947	0.021	1.238	2.527	4.03	5.09	18.14	92.35
20.15	1.0	277.0	0.986	0.022	1.289	2.592	4.03	5.22	22.17	115.79
24.18	1.2	280.0	0.996	0.022	1.303	2.606	4.03	5.25	26.20	137.58
28.21	1.4	280.0	0.996	0.022	1.303	2.611	4.03	5.26	30.23	159.02
32.24	1.6	281.0	1.000	0.022	1.308	2.611	4.03	5.26	34.26	180.23
36.27	1.8	280.0	0.996	0.022	1.303	2.602	4.03	5.24	38.29	200.71
40.3	2.0	279.0	0.993	0.022	1.299	2.523	4.03	5.08	42.32	215.09
44.33	2.2	263.0	0.936	0.021	1.224	2.160	4.03	4.35	46.35	201.68
48.36	2.4	201.0	0.715	0.016	0.936	1.434	4.03	2.89	50.38	145.51
52.39	2.6	107.0	0.381	0.009	0.498	0.787	4.03	1.58	54.41	86.23
56.42	2.8	62.0	0.221	0.005	0.289	0.451	4.03	0.91	58.44	53.16
60.45	3.0	35.0	0.125	0.003	0.163	0.301	4.03	0.61	62.47	37.84
64.48	3.2	29.6	0.105	0.002	0.138	0.265	4.03	0.53	66.50	35.55
68.51	3.4	27.4	0.098	0.002	0.128	0.204	4.03	0.41	70.53	28.97
72.54	3.6	16.4	0.058	0.001	0.076	0.147	4.03	0.30	74.56	22.03
76.57	3.8	15.1	0.054	0.001	0.070	0.130	4.03	0.26	78.59	20.64
80.6	4.0	12.9	0.046	0.001	0.060	0.118	4.03	0.24	82.62	19.68

ตารางที่ ข-4 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 2 (ดินตัวอย่าง S3) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
84.63	4.2	12.5	0.044	0.001	0.058	0.116	4.03	0.23	86.65	20.32
88.66	4.4	12.5	0.044	0.001	0.058	0.116	4.03	0.23	90.68	21.17
92.69	4.6	12.4	0.044	0.001	0.058	0.114	4.03	0.23	94.71	21.85
96.72	4.8	12.2	0.043	0.001	0.057	0.114	4.03	0.23	98.74	22.59
100.75	5.0	12.2	0.043	0.001	0.057					
sum area = 56.74			sum area moment = 1,925.06			mean residence time = 33.93				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 3 (ดินตัวอย่าง S8) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.173	6.06	0.52	3.03	1.59
6.06	0.2	37.2	0.018	0.003	0.173	0.512	6.06	1.55	9.09	14.11
12.12	0.4	72.9	0.035	0.006	0.339	1.845	6.06	5.59	15.15	84.67
18.18	0.6	323.4	0.153	0.026	1.505	6.071	6.06	18.40	21.21	390.17
24.24	0.8	981.0	0.465	0.078	4.566	13.698	6.06	41.50	27.27	1,131.82
30.30	1.0	1,962.0	0.930	0.156	9.132	18.776	6.06	56.89	33.33	1,896.15
36.36	1.2	2,072.0	0.982	0.165	9.644	19.427	6.06	58.86	39.39	2,318.68
42.42	1.4	2,102.0	0.997	0.167	9.783	19.572	6.06	59.30	45.45	2,695.26
48.48	1.6	2,103.0	0.997	0.167	9.788	19.576	6.06	59.32	51.51	3,055.36
54.54	1.8	2,103.0	0.997	0.167	9.788	19.581	6.06	59.33	57.57	3,415.63
60.6	2.0	2,104.0	0.998	0.168	9.793	19.590	6.06	59.36	63.63	3,776.96
66.66	2.2	2,105.0	0.998	0.168	9.797	19.604	6.06	59.40	69.69	4,139.62
72.72	2.4	2,107.0	0.999	0.168	9.807	19.609	6.06	59.41	75.75	4,500.65
78.78	2.6	2,106.0	0.999	0.168	9.802	19.609	6.06	59.41	81.81	4,860.71
84.84	2.8	2,107.0	0.999	0.168	9.807	19.106	6.06	57.89	87.87	5,086.92
90.90	3.0	1,998.0	0.947	0.159	9.299	18.017	6.06	54.59	93.93	5,127.78
96.96	3.2	1,873.0	0.888	0.149	8.718	15.350	6.06	46.51	99.99	4,650.60
103.02	3.4	1,425.0	0.676	0.113	6.632	9.992	6.06	30.28	106.05	3,210.88
109.1	3.6	721.9	0.342	0.057	3.360	4.540	6.06	13.76	112.11	1,542.32
115.14	3.8	253.6	0.120	0.020	1.180	2.233	6.06	6.77	118.17	799.59
121.2	4.0	226.2	0.107	0.018	1.053	1.849	6.06	5.60	124.23	696.06

ตารางที่ ข-5 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 3 (ดินตัวอย่าง S8) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
127.26	4.2	171.1	0.081	0.014	0.796	1.398	6.06	4.24	130.29	551.78
133.3	4.4	129.2	0.061	0.010	0.601	1.144	6.06	3.47	136.35	472.46
139.38	4.6	116.5	0.055	0.009	0.542	1.074	6.06	3.25	142.41	463.33
145.4	4.8	114.2	0.054	0.009	0.532	1.054	6.06	3.19	148.47	474.04
151.50	5.0	112.2	0.053	0.009	0.522					
sum area = 828.40			sum area moment = 55,357.13			mean residence time = 66.82				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-6 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 3 (ดินตัวอย่าง S8) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.157	4.04	0.32	2.02	0.64
4.04	0.2	33.8	0.016	0.003	0.157	1.015	4.04	2.05	6.06	12.43
8.08	0.4	184.3	0.087	0.015	0.858	3.081	4.04	6.22	10.10	62.85
12.12	0.6	477.6	0.226	0.038	2.223	9.353	4.04	18.89	14.14	267.16
16.16	0.8	1,532.0	0.726	0.122	7.130	16.272	4.04	32.87	18.18	597.55
20.20	1.0	1,964.0	0.931	0.156	9.141	18.622	4.04	37.62	22.22	835.84
24.24	1.2	2,037.0	0.966	0.162	9.481	19.246	4.04	38.88	26.26	1,020.89
28.28	1.4	2,098.0	0.995	0.167	9.765	19.544	4.04	39.48	30.30	1,196.19
32.32	1.6	2,101.0	0.996	0.167	9.779	19.567	4.04	39.53	34.34	1,357.29
36.36	1.8	2,103.0	0.997	0.167	9.788	19.576	4.04	39.54	38.38	1,517.70
40.40	2.0	2,103.0	0.997	0.167	9.788	19.595	4.04	39.58	42.42	1,679.05
44.44	2.2	2,107.0	0.999	0.168	9.807	19.609	4.04	39.61	46.46	1,840.27
48.48	2.4	2,106.0	0.999	0.168	9.802	19.590	4.04	39.57	50.50	1,998.39
52.52	2.6	2,103.0	0.997	0.167	9.788	19.534	4.04	39.46	54.54	2,152.11
56.56	2.8	2,094.0	0.993	0.167	9.746	18.901	4.04	38.18	58.58	2,236.62
60.60	3.0	1,967.0	0.933	0.157	9.155	14.387	4.04	29.06	62.62	1,819.79
64.64	3.2	1,124.0	0.533	0.090	5.231	8.871	4.04	17.92	66.66	1,194.53
68.68	3.4	782.0	0.371	0.062	3.640	5.166	4.04	10.44	70.70	737.82
72.72	3.6	328.0	0.156	0.026	1.527	2.718	4.04	5.49	74.74	410.37
76.76	3.8	256.0	0.121	0.020	1.192	1.951	4.04	3.94	78.78	310.49
80.80	4.0	163.2	0.077	0.013	0.760	1.328	4.04	2.68	82.82	222.23

ตารางที่ ข-6 ความเข้มข้นเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 3 (ดินตัวอย่าง S8) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น ($\mu\text{s/cm}$)	ความเข้มข้น C/C0	ความเข้มข้น (mol/l)	ความเข้มข้น (mg/l)	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
84.84	4.2	122.2	0.058	0.010	0.569	1.121	4.04	2.26	86.86	196.73
88.88	4.4	118.7	0.056	0.009	0.552	1.080	4.04	2.18	90.90	198.36
92.92	4.6	113.4	0.054	0.009	0.528	1.047	4.04	2.11	94.94	200.75
96.96	4.8	111.5	0.053	0.009	0.519	1.037	4.04	2.09	98.98	207.24
101.00	5.0	111.2	0.053	0.009	0.518					
sum area = 529.98			sum area moment = 22,273.29			mean residence time = 42.03				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาปริมาณไนเตรท ณ เวลาต่างๆ

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นไนเตรท ณ เวลาต่างๆ ในดินทดลองชุดที่ 1 (ดินตัวอย่าง S2) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

c (นาท)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาท	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	37.400	6.230	116.50	3.115	362.90
6.23	0.2	37.4	0.094	125.000	6.230	389.38	9.345	3638.71
12.46	0.4	87.6	0.219	204.000	6.230	635.46	15.575	9897.29
18.69	0.6	116.4	0.291	323.900	6.230	1008.95	21.805	22000.12
24.92	0.8	207.5	0.519	457.300	6.230	1424.49	28.035	39935.56
31.15	1.0	249.8	0.625	571.100	6.230	1778.98	34.265	60956.63
37.38	1.2	321.3	0.803	648.500	6.230	2020.08	40.495	81803.04
43.61	1.4	327.2	0.818	674.600	6.230	2101.38	46.725	98186.93
49.84	1.6	347.4	0.869	706.600	6.230	2201.06	52.955	116557.08
56.07	1.8	359.2	0.898	721.100	6.230	2246.23	59.185	132942.92
62.30	2.0	361.9	0.905	686.300	6.230	2137.82	65.415	139845.79
68.53	2.2	324.4	0.811	627.800	6.230	1955.60	71.645	140108.75
74.76	2.4	303.4	0.759	590.600	6.230	1839.72	77.875	143268.12
80.99	2.6	287.2	0.718	519.800	6.230	1619.18	84.105	136180.88
87.22	2.8	232.6	0.582	431.300	6.230	1343.50	90.335	121365.03
93.45	3.0	198.7	0.497	354.900	6.230	1105.51	96.565	106753.91
99.68	3.2	156.2	0.391	280.500	6.230	873.76	102.795	89817.90
105.91	3.4	124.3	0.311	236.400	6.230	736.39	109.025	80284.48
112.14	3.6	112.1	0.280	219.700	6.230	684.37	115.255	78876.55
118.37	3.8	107.6	0.269	201.200	6.230	626.74	121.485	76139.27
124.60	4.0	93.6	0.234	169.500	6.230	527.99	127.715	67432.56

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นไนเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 1 (ดินตัวอย่าง S2) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
130.83	4.2	75.9	0.190	140.800	6.230	438.59	133.945	58747.21
137.06	4.4	64.9	0.162	111.300	6.230	346.70	140.175	48598.60
143.29	4.6	46.4	0.116	83.600	6.230	260.41	146.405	38125.91
149.52	4.8	37.2	0.093	69.600	6.230	216.80	152.635	33091.88
155.75	5.0	32.4	0.081					
sum area = 27,808.70		sum area moment = 1,924,918.01			mean residence time = 69.22			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-2 ความเข้มข้นไนเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 1 (ดินตัวอย่าง S2) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	55.300	4.200	116.13	2.100	243.87
4.20	0.2	55.3	0.138	156.500	4.200	328.65	6.300	2070.50
8.40	0.4	101.2	0.253	262.746	4.200	551.77	10.500	5793.55
12.60	0.6	161.5	0.404	359.664	4.200	755.29	14.700	11102.82
16.80	0.8	198.1	0.495	485.311	4.200	1019.15	18.900	19261.99
21.00	1.0	287.2	0.718	618.555	4.200	1298.96	23.100	30006.08
25.20	1.2	331.4	0.828	679.328	4.200	1426.59	27.300	38945.86
29.40	1.4	348.0	0.870	695.933	4.200	1461.46	31.500	46035.95
33.60	1.6	348.0	0.870	687.529	4.200	1443.81	35.700	51544.08
37.80	1.8	339.6	0.849	618.689	4.200	1299.25	39.900	51839.96
42.00	2.0	279.1	0.698	491.429	4.200	1032.00	44.100	45511.20
46.20	2.2	212.3	0.531	386.824	4.200	812.33	48.300	39235.51
50.40	2.4	174.5	0.436	304.605	4.200	639.67	52.500	33582.71
54.60	2.6	130.1	0.325	247.059	4.200	518.82	56.700	29417.29
58.80	2.8	117.0	0.292	219.630	4.200	461.22	60.900	28088.51
63.00	3.0	102.7	0.257	197.244	4.200	414.21	65.100	26965.19
67.20	3.2	94.6	0.236	177.277	4.200	372.28	69.300	25799.17
71.40	3.4	82.7	0.207	159.866	4.200	335.72	73.500	24675.25
75.60	3.6	77.2	0.193	152.471	4.200	320.19	77.700	24878.63
79.80	3.8	75.3	0.188	141.647	4.200	297.46	81.900	24361.88
84.00	4.0	66.4	0.166	125.653	4.200	263.87	86.100	22719.31

ตารางที่ ค-2 ความเข้มข้นในเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 1 (ดินตัวอย่าง S2) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
88.20	4.2	59.3	0.148	105.619	4.200	221.80	90.300	20028.59
92.40	4.4	46.3	0.116	85.782	4.200	180.14	94.500	17023.34
96.60	4.6	39.5	0.099	78.454	4.200	164.75	98.700	16261.12
100.80	4.8	39.0	0.097	78.454	4.200	164.75	102.900	16953.08
105.00	5.0	39.5	0.099					
sum area = 13,947.95		sum area moment = 652,345.43			mean residence time = 46.77			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-3 ความเข้มข้นไนเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 2 (ดินตัวอย่าง S3) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	48.100	6.040	145.26	3.020	438.69
6.04	0.2	48.1	0.120	138.600	6.040	418.57	9.060	3792.26
12.08	0.4	90.5	0.226	203.000	6.040	613.06	15.100	9257.21
18.12	0.6	112.5	0.281	335.700	6.040	1013.81	21.140	21432.03
24.16	0.8	223.2	0.558	498.000	6.040	1503.96	27.180	40877.63
30.20	1.0	274.8	0.687	602.000	6.040	1818.04	33.220	60395.29
36.24	1.2	327.2	0.818	657.500	6.040	1985.65	39.260	77956.62
42.28	1.4	330.3	0.826	688.100	6.040	2078.06	45.300	94136.21
48.32	1.6	357.8	0.895	714.900	6.040	2159.00	51.340	110842.96
54.36	1.8	357.1	0.893	726.800	6.040	2194.94	57.380	125945.43
60.40	2.0	369.7	0.924	718.100	6.040	2168.66	63.420	137536.54
66.44	2.2	348.4	0.871	662.500	6.040	2000.75	69.460	138972.10
72.48	2.4	314.1	0.785	623.900	6.040	1884.18	75.500	142255.44
78.52	2.6	309.8	0.775	597.200	6.040	1803.54	81.540	147060.98
84.56	2.8	287.4	0.719	545.800	6.040	1648.32	87.580	144359.52
90.60	3.0	258.4	0.646	484.700	6.040	1463.79	93.620	137040.39
96.64	3.2	226.3	0.566	417.000	6.040	1259.34	99.660	125505.82
102.68	3.4	190.7	0.477	373.600	6.040	1128.27	105.700	119258.35
108.72	3.6	182.9	0.457	335.500	6.040	1013.21	111.740	113216.09
114.76	3.8	152.6	0.382	270.800	6.040	817.82	117.780	96322.37
120.80	4.0	118.2	0.296	210.500	6.040	635.71	123.820	78713.61

ตารางที่ ค-3 ความเข้มข้นในเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 2 (ดินตัวอย่าง S3) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
126.84	4.2	92.3	0.231	155.800	6.040	470.52	129.860	61101.21
132.88	4.4	63.5	0.159	123.100	6.040	371.76	135.900	50522.46
138.92	4.6	59.6	0.149	108.700	6.040	328.27	141.940	46595.21
144.96	4.8	49.1	0.123	98.000	6.040	295.96	147.980	43796.16
151.00	5.0	48.9	0.122					
sum area = 31,220.46		sum area moment = 1,883,530.35			mean residence time = 60.33			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-4 ความเข้มข้นไนเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 2 (ดินตัวอย่าง S3) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	48.800	4.030	98.33	2.015	198.14
4.03	0.2	48.8	0.122	183.100	4.030	368.95	6.045	2230.28
8.06	0.4	134.3	0.336	379.500	4.030	764.69	10.075	7704.28
12.09	0.6	245.2	0.613	548.400	4.030	1105.03	14.105	15586.39
16.12	0.8	303.2	0.758	620.800	4.030	1250.91	18.135	22685.29
20.15	1.0	317.6	0.794	654.800	4.030	1319.42	22.165	29244.99
24.18	1.2	337.2	0.843	714.400	4.030	1439.52	26.195	37708.12
28.21	1.4	377.2	0.943	757.000	4.030	1525.36	30.225	46103.85
32.24	1.6	379.8	0.950	761.900	4.030	1535.23	34.255	52589.25
36.27	1.8	382.1	0.955	751.800	4.030	1514.88	38.285	57997.07
40.30	2.0	369.7	0.924	698.100	4.030	1406.67	42.315	59523.30
44.33	2.2	328.4	0.821	619.800	4.030	1248.90	46.345	57880.13
48.36	2.4	291.4	0.729	571.200	4.030	1150.97	50.375	57980.01
52.39	2.6	279.8	0.700	538.900	4.030	1085.88	54.405	59077.49
56.42	2.8	259.1	0.648	477.500	4.030	962.16	58.435	56223.97
60.45	3.0	218.4	0.546	395.700	4.030	797.34	62.465	49805.56
64.48	3.2	177.3	0.443	319.000	4.030	642.79	66.495	42741.99
68.51	3.4	141.7	0.354	264.600	4.030	533.17	70.525	37601.74
72.54	3.6	122.9	0.307	225.500	4.030	454.38	74.555	33876.49
76.57	3.8	102.6	0.257	194.700	4.030	392.32	78.585	30830.51
80.60	4.0	92.1	0.230	151.400	4.030	305.07	82.615	25203.44

ตารางที่ ค-4 ความเข้มข้นในเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 2 (ดินตัวอย่าง S3) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
84.63	4.2	59.3	0.148	116.800	4.030	235.35	86.645	20392.07
88.66	4.4	57.5	0.144	112.100	4.030	225.88	90.675	20481.81
92.69	4.6	54.6	0.137	101.700	4.030	204.93	94.705	19407.47
96.72	4.8	47.1	0.118	93.000	4.030	187.40	98.735	18502.45
100.75	5.0	45.9	0.115					
sum area = 20,755.51		sum area moment = 776,048.52			mean residence time = 37.39			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-5 ความเข้มข้นไนเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 3 (ดินตัวอย่าง S8) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	12.900	6.060	39.09	3.030	118.43
6.06	0.2	12.9	0.032	64.200	6.060	194.53	9.090	1768.24
12.12	0.4	51.3	0.128	159.400	6.060	482.98	15.150	7317.18
18.18	0.6	108.1	0.270	324.400	6.060	982.93	21.210	20847.99
24.24	0.8	216.3	0.541	466.000	6.060	1411.98	27.270	38504.69
30.30	1.0	249.7	0.624	526.800	6.060	1596.20	33.330	53201.48
36.36	1.2	277.1	0.693	571.000	6.060	1730.13	39.390	68149.82
42.42	1.4	293.9	0.735	613.300	6.060	1858.30	45.450	84459.69
48.48	1.6	319.4	0.799	649.600	6.060	1968.29	51.510	101386.51
54.54	1.8	330.2	0.826	668.300	6.060	2024.95	57.570	116576.31
60.60	2.0	338.1	0.845	692.600	6.060	2098.58	63.630	133532.52
66.66	2.2	354.5	0.886	713.100	6.060	2160.69	69.690	150578.70
72.72	2.4	358.6	0.897	686.000	6.060	2078.58	75.750	157452.44
78.78	2.6	327.4	0.819	616.600	6.060	1868.30	81.810	152845.46
84.84	2.8	289.2	0.723	544.000	6.060	1648.32	87.870	144837.88
90.90	3.0	254.8	0.637	452.300	6.060	1370.47	93.930	128728.15
96.96	3.2	197.5	0.494	346.700	6.060	1050.50	99.990	105039.59
103.02	3.4	149.2	0.373	281.600	6.060	853.25	106.050	90486.95
109.08	3.6	132.4	0.331	234.500	6.060	710.54	112.110	79658.08
115.14	3.8	102.1	0.255	191.300	6.060	579.64	118.170	68495.94
121.20	4.0	89.2	0.223	154.400	6.060	467.83	124.230	58118.77

ตารางที่ ค-5 ความเข้มข้นในเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 3 (ดินตัวอย่าง S8) ที่อัตรา
การไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
127.26	4.2	65.2	0.163	123.500	6.060	374.20	130.290	48755.17
133.32	4.4	58.3	0.146	109.600	6.060	332.09	136.350	45280.20
139.38	4.6	51.3	0.128	98.700	6.060	299.06	142.410	42589.28
145.44	4.8	47.4	0.119	88.600	6.060	268.46	148.470	39857.96
151.50	5.0	41.2	0.103					
sum area = 27,638.83		sum area moment = 1,938,587.43			mean residence time = 70.14			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-6 ความเข้มข้นไนเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 3 (ดินตัวอย่าง S8) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
0.00	0.0	0.0	0.000	28.500	4.040	57.57	2.020	116.29
4.04	0.2	28.5	0.071	90.700	4.040	183.21	6.060	1110.28
8.08	0.4	62.2	0.156	197.900	4.040	399.76	10.100	4037.56
12.12	0.6	135.7	0.339	364.400	4.040	736.09	14.140	10408.28
16.16	0.8	228.7	0.572	507.000	4.040	1024.14	18.180	18618.87
20.20	1.0	278.3	0.696	574.200	4.040	1159.88	22.220	25772.62
24.24	1.2	295.9	0.740	602.900	4.040	1217.86	26.260	31980.95
28.28	1.4	307.0	0.768	628.000	4.040	1268.56	30.300	38437.37
32.32	1.6	321.0	0.803	691.400	4.040	1396.63	34.340	47960.21
36.36	1.8	370.4	0.926	731.700	4.040	1478.03	38.380	56726.94
40.40	2.0	361.3	0.903	716.000	4.040	1446.32	42.420	61352.89
44.44	2.2	354.7	0.887	680.200	4.040	1374.00	46.460	63836.23
48.48	2.4	325.5	0.814	627.900	4.040	1268.36	50.500	64052.08
52.52	2.6	302.4	0.756	558.900	4.040	1128.98	54.540	61574.46
56.56	2.8	256.5	0.641	480.700	4.040	971.01	58.580	56882.00
60.60	3.0	224.2	0.561	421.700	4.040	851.83	62.620	53341.85
64.64	3.2	197.5	0.494	350.800	4.040	708.62	66.660	47236.34
68.68	3.4	153.3	0.383	271.900	4.040	549.24	70.700	38831.13
72.72	3.6	118.6	0.297	226.500	4.040	457.53	74.740	34195.79
76.76	3.8	107.9	0.270	190.700	4.040	385.21	78.780	30347.16
80.80	4.0	82.8	0.207	154.600	4.040	312.29	82.820	25864.02

ตารางที่ ค-6 ความเข้มข้นในเตรท ณ เวลาต่าง ๆ ในดินทดลองชุดที่ 3 (ดินตัวอย่าง S8) ที่อัตรา
การไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	ความเข้มข้น C/C0	C2+C1 (mg/l)	T2-T1 นาที	Area	Moment arm	Area Moment
84.84	4.2	71.8	0.180	131.100	4.040	264.82	86.860	23002.44
88.88	4.4	59.3	0.148	100.500	4.040	203.01	90.900	18453.61
92.92	4.6	41.2	0.103	77.600	4.040	156.75	94.940	14882.03
96.96	4.8	36.4	0.091	70.500	4.040	142.41	98.980	14095.74
101.00	5.0	34.1	0.085					
sum area = 19,142.13		sum area moment = 843,117.14			mean residence time = 44.05			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงผลการทดลอง Leaching test

ตาราง ง-1 ความเข้มข้นของไนเตรทที่ถูกชะล้างในคอลัมน์ ณ เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากตัวอย่างดินทดลองชุดที่ 4 (S10)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)
6.74	0.2	24.60	141.54	4.2	10.30
13.48	0.4	24.16	148.28	4.4	9.05
20.22	0.6	23.32	155.02	4.6	8.28
26.96	0.8	23.10	161.76	4.8	7.21
33.70	1.0	20.01	168.50	5.0	6.01
40.44	1.2	18.99	175.24	5.2	4.75
47.18	1.4	19.60	181.98	5.4	4.50
53.92	1.6	19.79	188.72	5.6	3.97
60.66	1.8	19.36	195.46	5.8	3.64
67.40	2.0	18.06	202.20	6.0	3.12
74.14	2.2	16.87	208.94	6.2	2.31
80.88	2.4	17.30	215.68	6.4	2.07
87.62	2.6	16.46	222.42	6.6	1.68
94.36	2.8	15.33	229.16	6.8	1.61
101.10	3.0	14.78	235.90	7.0	1.57
107.84	3.2	14.47	242.64	7.2	1.62
114.58	3.4	13.46	249.38	7.4	1.65
121.32	3.6	12.21	256.12	7.6	1.51
128.06	3.8	11.63	262.86	7.8	1.48
134.80	4.0	11.32	269.60	8.0	1.52

ตาราง ง-2 ความเข้มข้นของไนเตรทที่ถูกชะล้างในคอลัมน์ ณ เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากตัวอย่างดินทดลองชุดที่ 4 (S10)

เวลา (นาทีก)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	เวลา (นาทีก)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)
4.49	0.2	23.97	94.29	4.2	7.36
8.98	0.4	24.24	98.78	4.4	6.11
13.47	0.6	23.17	103.27	4.6	5.29
17.96	0.8	22.41	107.76	4.8	4.74
22.45	1.0	19.85	112.25	5.0	4.02
26.94	1.2	18.64	116.74	5.2	3.45
31.43	1.4	18.29	121.23	5.4	2.98
35.92	1.6	17.78	125.72	5.6	2.23
40.41	1.8	17.01	130.21	5.8	1.55
44.90	2.0	16.42	134.70	6.0	1.22
49.39	2.2	15.91	139.19	6.2	1.02
53.88	2.4	15.72	143.68	6.4	0.87
58.37	2.6	15.29	148.17	6.6	0.84
62.86	2.8	14.13	152.66	6.8	0.78
67.35	3.0	13.55	157.15	7.0	0.74
71.84	3.2	12.01	161.64	7.2	0.72
76.33	3.4	11.04	166.13	7.4	0.72
80.82	3.6	10.16	170.62	7.6	0.73
85.31	3.8	9.47	175.11	7.8	0.69
89.80	4.0	8.11	179.60	8.0	0.66

ตาราง ง-3 ความเข้มข้นของไนเตรทที่ถูกชะล้างในคอลัมน์ ณ เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากตัวอย่างดินทดลองชุดที่ 5 (S11)

เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	เวลา (นาที)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)
6.56	0.2	24.16	137.76	4.2	6.42
13.12	0.4	25.66	144.32	4.4	6.07
19.68	0.6	24.87	150.88	4.6	5.88
26.24	0.8	24.48	157.44	4.8	5.40
32.80	1.0	23.55	164.00	5.0	4.70
39.36	1.2	22.25	170.56	5.2	4.41
45.92	1.4	20.75	177.12	5.4	4.27
52.48	1.6	19.45	183.68	5.6	4.13
59.04	1.8	17.61	190.24	5.8	3.71
65.60	2.0	14.60	196.80	6.0	3.52
72.16	2.2	13.70	203.36	6.2	3.31
78.72	2.4	12.67	209.92	6.4	3.03
85.28	2.6	12.09	216.48	6.6	2.85
91.84	2.8	11.17	223.04	6.8	2.70
98.40	3.0	10.80	229.60	7.0	2.53
104.96	3.2	9.12	236.16	7.2	2.27
111.52	3.4	8.28	242.72	7.4	2.06
118.08	3.6	7.57	249.28	7.6	1.99
124.64	3.8	7.11	255.84	7.8	1.86
131.20	4.0	6.72	262.40	8.0	1.77

ตาราง ง-4 ความเข้มข้นของไนเตรทที่ถูกชะล้างในคอลัมน์ ณ เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากตัวอย่างดินทดลองชุดที่ 5 (S11)

เวลา (นาทีก)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	เวลา (นาทีก)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)
6.56	0.2	24.77	137.76	4.2	4.54
13.12	0.4	25.41	144.32	4.4	4.01
19.68	0.6	24.65	150.88	4.6	3.63
26.24	0.8	23.89	157.44	4.8	3.11
32.80	1.0	22.01	164.00	5.0	2.67
39.36	1.2	21.37	170.56	5.2	2.16
45.92	1.4	19.64	177.12	5.4	1.54
52.48	1.6	17.97	183.68	5.6	1.22
59.04	1.8	16.72	190.24	5.8	1.01
65.60	2.0	14.05	196.80	6.0	0.96
72.16	2.2	12.86	203.36	6.2	0.91
78.72	2.4	11.46	209.92	6.4	0.82
85.28	2.6	10.88	216.48	6.6	0.78
91.84	2.8	10.11	223.04	6.8	0.81
98.40	3.0	9.62	229.60	7.0	0.76
104.96	3.2	8.32	236.16	7.2	0.73
111.52	3.4	7.66	242.72	7.4	0.72
118.08	3.6	6.43	249.28	7.6	0.70
124.64	3.8	5.56	255.84	7.8	0.69
131.20	4.0	5.03	262.40	8.0	0.68

ตาราง ง-5 ความเข้มข้นของไนเตรทที่ถูกชะล้างในคอลัมน์ ณ เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากตัวอย่างดินทดลองชุดที่ 6 (S13)

เวลา (นาทีก)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	เวลา (นาทีก)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)
6.58	0.2	37.15	138.18	4.2	11.16
13.16	0.4	37.20	144.76	4.4	9.68
19.74	0.6	35.60	151.34	4.6	9.88
26.32	0.8	35.32	157.92	4.8	9.13
32.90	1.0	33.05	164.50	5.0	8.78
39.48	1.2	31.58	171.08	5.2	8.37
46.06	1.4	30.18	177.66	5.4	7.91
52.64	1.6	29.14	184.24	5.6	7.57
59.22	1.8	29.00	190.82	5.8	7.28
65.80	2.0	27.32	197.40	6.0	6.79
72.38	2.2	25.83	203.98	6.2	5.23
78.96	2.4	24.14	210.56	6.4	4.32
85.54	2.6	23.84	217.14	6.6	3.50
92.12	2.8	21.59	223.72	6.8	3.12
98.70	3.0	21.21	230.30	7.0	3.05
105.28	3.2	20.10	236.88	7.2	3.13
111.86	3.4	17.28	243.46	7.4	2.87
118.44	3.6	15.72	250.04	7.6	3.08
125.02	3.8	12.78	256.62	7.8	2.90
131.60	4.0	11.85	263.20	8.0	2.74

ตาราง ง-6 ความเข้มข้นของไนเตรทที่ถูกชะล้างในคอลัมน์ ณ เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากตัวอย่างดินทดลองชุดที่ 6 (S13)

เวลา (นาทีก)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)	เวลา (นาทีก)	Pore Volume	ความเข้มข้น (mg/l)
6.58	0.2	36.72	138.18	4.2	9.47
13.16	0.4	37.07	144.76	4.4	8.65
19.74	0.6	35.21	151.34	4.6	8.24
26.32	0.8	34.89	157.92	4.8	7.56
32.90	1.0	32.21	164.50	5.0	6.84
39.48	1.2	30.45	171.08	5.2	5.63
46.06	1.4	29.18	177.66	5.4	4.75
52.64	1.6	28.76	184.24	5.6	4.12
59.22	1.8	27.94	190.82	5.8	3.97
65.80	2.0	26.22	197.40	6.0	3.72
72.38	2.2	24.76	203.98	6.2	3.41
78.96	2.4	23.82	210.56	6.4	3.01
85.54	2.6	22.11	217.14	6.6	2.52
92.12	2.8	20.94	223.72	6.8	2.14
98.70	3.0	20.03	230.30	7.0	1.72
105.28	3.2	18.11	236.88	7.2	1.48
111.86	3.4	16.28	243.46	7.4	1.12
118.44	3.6	14.65	250.04	7.6	0.83
125.02	3.8	11.72	256.62	7.8	0.81
131.60	4.0	10.63	263.20	8.0	0.79

ภาคผนวก จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination (R Square))

ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (นิยมนำเสนอในรูปของร้อยละ) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ r^2 เป็นค่าที่อธิบายว่าสมการถดถอยที่ใช้ประมาณค่ามีความสามารถอธิบายความผันผวนของตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใดหรือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอธิบายตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด ยิ่งค่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าสูงมากเท่าใดความแม่นยำของการนำสมการไปใช้เพื่อทำนายหรือคาดคะเนผลลัพธ์ย่อมมีสูงมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไป สมการที่มักนำไปใช้ควรมีค่า R Square อย่างน้อย 0.75 (Haaland , 1989 และ Hu , 1999) หากสูงกว่า 0.90 ถือว่าดีมาก (ค่า R² มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยที่ 0 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ใด ๆ ระหว่างตัวแปรตามและอิสระ , 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์) อย่างไรก็ตามค่า R Square เป็นการประมาณ Goodness of fit ที่เกินจริง จึงมักใช้ค่า adjusted R square ในการวัด Goodness of fit แทน (Hu, 1999) โดยทั่วไป adjusted R Square จะมีค่าต่ำกว่าค่า R Square เล็กน้อย โดยมีสมการการหาค่าดังนี้

$$r = \frac{n\sum(xy) - \sum x \sum y}{\sqrt{[n\sum(x^2) - (\sum x)^2][n\sum(y^2) - (\sum y)^2]}}$$

A11		=COUNT(B3:B8)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		x	y	xy	x ²	y ²				
3		1.0	2.6	2.6	1.0	6.8				
4		2.3	2.8	6.44	5.3	7.8				
5		3.1	3.1	9.61	9.6	9.6				
6		4.8	4.7	22.56	23.0	22.09				
7		5.6	5.1	28.56	31.4	26.0				
8		6.3	5.3	33.39	39.7	28.1				
9										
10	n	Σ x	Σ y	Σ (xy)	Σ (x ²)	Σ (y ²)				
11	6	23.1	23.6	103.16	110.0	100.4				
12										
13		(Σ x) ²	(Σ y) ²							
14		533.61	556.96							
15										
16	slope, m =	0.5842					=(A11*D11-B11*C11)/(A11*E11-B14)			
17	y-int, b =	1.6842					=(C11-C16*B11)/A11			
18	r =	0.9741					=(A11*D11-B11*C11)/SQRT((A11*E11-B14)*(A11*F11-C14))			

รูปที่ จ-1 ตัวอย่างการทำรูปแบบตารางเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

ตารางที่ ๑-1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.35 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/Coโมเดล
0	0	0	0.000	0.00	0.000
0.0064	0.2	37.4	0.094	36.48	0.091
0.0128	0.4	87.6	0.219	80.44	0.201
0.0192	0.6	116.4	0.291	127.40	0.319
0.0256	0.8	207.5	0.519	194.84	0.487
0.032	1.0	249.8	0.625	258.32	0.646
0.0384	1.2	321.3	0.803	326.60	0.817
0.0448	1.4	327.2	0.818	368.64	0.922
0.0512	1.6	347.4	0.869	391.32	0.978
0.0576	1.8	359.2	0.898	400.00	1.000
0.064	2.0	361.9	0.905	373.48	0.934
0.0704	2.2	324.4	0.811	331.16	0.828
0.0768	2.4	303.4	0.759	296.96	0.742
0.0832	2.6	287.2	0.718	263.04	0.658
0.0896	2.8	232.6	0.582	227.92	0.570
0.096	3.0	198.7	0.497	191.56	0.479
0.1024	3.2	156.2	0.391	155.92	0.390
0.1088	3.4	124.3	0.311	127.64	0.319
0.1152	3.6	112.1	0.280	111.88	0.280
0.1216	3.8	107.6	0.269	101.04	0.253
0.128	4.0	93.6	0.234	86.24	0.216
0.1344	4.2	75.9	0.190	72.68	0.182
0.1408	4.4	64.9	0.162	61.72	0.154
0.1472	4.6	46.4	0.116	47.60	0.119
0.1536	4.8	37.2	0.093	34.92	0.087
0.16	5.0	32.4	0.081	28.68	0.072

ตารางที่ ๑-1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.35 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
37.4	36.48	1,364.35	1,398.76	1,330.79
87.6	80.44	7,046.54	7,673.76	6,470.59
116.4	127.40	14,829.36	13,548.96	16,230.76
207.5	194.84	40,429.30	43,056.25	37,962.63
249.8	258.32	64,528.34	62,400.04	66,729.22
321.3	326.60	104,936.58	103,233.69	106,667.56
327.2	368.64	120,619.01	107,059.84	135,895.45
347.4	391.32	135,944.57	120,686.76	153,131.34
359.2	400.00	143,680.00	129,024.64	160,000.00
361.9	373.48	135,162.41	130,971.61	139,487.31
324.4	331.16	107,428.30	105,235.36	109,666.95
303.4	296.96	90,097.66	92,051.56	88,185.24
287.2	263.04	75,545.09	82,483.84	69,190.04
232.6	227.92	53,014.19	54,102.76	51,947.53
198.7	191.56	38,062.97	39,481.69	36,695.23
156.2	155.92	24,354.70	24,398.44	24,311.05
124.3	127.64	15,865.65	15,450.49	16,291.97
112.1	111.88	12,541.75	12,566.41	12,517.13
107.6	101.04	10,871.90	11,577.76	10,209.08
93.6	86.24	8,072.06	8,760.96	7,437.34
75.9	72.68	5,516.41	5,760.81	5,282.38
64.9	61.72	4,005.63	4,212.01	3,809.36
46.4	47.60	2,208.64	2,152.96	2,265.76
37.2	34.92	1,299.02	1,383.84	1,219.41
32.4	28.68	929.23	1,049.76	822.54

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	4,612.60	4,696.48	1,218,353.69	1,179,722.96	1,263,756.66

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
21,276,078.76	22,056,924.39	0.994

ตารางที่ ๑-2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.41 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0	0	0	0.000	0.00	0.000
0.0064	0.2	37.4	0.094	36.08	0.090
0.0128	0.4	87.6	0.219	82.84	0.207
0.0192	0.6	116.4	0.291	136.56	0.341
0.0256	0.8	207.5	0.519	208.84	0.522
0.032	1.0	249.8	0.625	269.04	0.673
0.0384	1.2	321.3	0.803	335.92	0.840
0.0448	1.4	327.2	0.818	375.76	0.939
0.0512	1.6	347.4	0.869	400.00	1.000
0.0576	1.8	359.2	0.898	393.40	0.984
0.064	2.0	361.9	0.905	367.04	0.918
0.0704	2.2	324.4	0.811	331.88	0.830
0.0768	2.4	303.4	0.759	291.28	0.728
0.0832	2.6	287.2	0.718	253.76	0.634
0.0896	2.8	232.6	0.582	212.68	0.532
0.096	3.0	198.7	0.497	182.44	0.456
0.1024	3.2	156.2	0.391	149.60	0.374
0.1088	3.4	124.3	0.311	123.28	0.308
0.1152	3.6	112.1	0.280	107.32	0.268
0.1216	3.8	107.6	0.269	91.12	0.228
0.128	4.0	93.6	0.234	80.76	0.202
0.1344	4.2	75.9	0.190	66.24	0.166
0.1408	4.4	64.9	0.162	55.40	0.139
0.1472	4.6	46.4	0.116	41.16	0.103
0.1536	4.8	37.2	0.093	26.80	0.067
0.16	5.0	32.4	0.081	24.88	0.062

ตารางที่ ๑-2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสไนใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.41 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
37.4	36.08	1,349.39	1,398.76	1,301.77
87.6	82.84	7,256.78	7,673.76	6,862.47
116.4	136.56	15,895.58	13,548.96	18,648.63
207.5	208.84	43,334.30	43,056.25	43,614.15
249.8	269.04	67,206.19	62,400.04	72,382.52
321.3	335.92	107,931.10	103,233.69	112,842.25
327.2	375.76	122,948.67	107,059.84	141,195.58
347.4	400.00	138,960.00	120,686.76	160,000.00
359.2	393.40	141,309.28	129,024.64	154,763.56
361.9	367.04	132,831.78	130,971.61	134,718.36
324.4	331.88	107,661.87	105,235.36	110,144.33
303.4	291.28	88,374.35	92,051.56	84,844.04
287.2	253.76	72,879.87	82,483.84	64,394.14
232.6	212.68	49,469.37	54,102.76	45,232.78
198.7	182.44	36,250.83	39,481.69	33,284.35
156.2	149.60	23,367.52	24,398.44	22,380.16
124.3	123.28	15,323.70	15,450.49	15,197.96
112.1	107.32	12,030.57	12,566.41	11,517.58
107.6	91.12	9,804.51	11,577.76	8,302.85
93.6	80.76	7,559.14	8,760.96	6,522.18
75.9	66.24	5,027.62	5,760.81	4,387.74
64.9	55.40	3,595.46	4,212.01	3,069.16
46.4	41.16	1,909.82	2,152.96	1,694.15
37.2	26.80	996.96	1,383.84	718.24
32.4	24.88	806.11	1,049.76	619.01

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	4,612.60	4,644.08	1,214,080.78	1,179,722.96	1,258,637.96

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
21,276,078.76	21,567,479.05	0.990

ตารางที่ ๑-3 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.55 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0	0.0	0.0	0.000	0.00	0.000
0.0064	0.2	37.4	0.094	31.24	0.078
0.0128	0.4	87.6	0.219	67.68	0.169
0.0192	0.6	116.4	0.291	120.52	0.301
0.0256	0.8	207.5	0.519	192.96	0.482
0.032	1.0	249.8	0.625	253.01	0.633
0.0384	1.2	321.3	0.803	321.04	0.803
0.0448	1.4	327.2	0.818	375.72	0.939
0.0512	1.6	347.4	0.869	400.00	1.000
0.0576	1.8	359.2	0.898	375.00	0.938
0.064	2.0	361.9	0.905	327.84	0.820
0.0704	2.2	324.4	0.811	288.48	0.721
0.0768	2.4	303.4	0.759	255.40	0.639
0.0832	2.6	287.2	0.718	223.48	0.559
0.0896	2.8	232.6	0.582	191.40	0.479
0.096	3.0	198.7	0.497	163.96	0.410
0.1024	3.2	156.2	0.391	142.72	0.357
0.1088	3.4	124.3	0.311	111.92	0.280
0.1152	3.6	112.1	0.280	95.32	0.238
0.1216	3.8	107.6	0.269	80.88	0.202
0.128	4.0	93.6	0.234	71.08	0.178
0.1344	4.2	75.9	0.190	56.48	0.141
0.1408	4.4	64.9	0.162	50.52	0.126
0.1472	4.6	46.4	0.116	41.32	0.103
0.1536	4.8	37.2	0.093	32.96	0.082
0.16	5.0	32.4	0.081	26.84	0.067

ตารางที่ ๑-3 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสิ้นใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.55 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
37.4	31.24	1,168.38	1,398.76	975.94
87.6	67.68	5,928.77	7,673.76	4,580.58
116.4	120.52	14,028.53	13,548.96	14,525.07
207.5	192.96	40,039.20	43,056.25	37,233.56
249.8	253.01	63,201.90	62,400.04	64,014.06
321.3	321.04	103,150.15	103,233.69	103,066.68
327.2	375.72	122,935.58	107,059.84	141,165.52
347.4	400.00	138,960.00	120,686.76	160,000.00
359.2	375.00	134,700.00	129,024.64	140,625.00
361.9	327.84	118,645.30	130,971.61	107,479.07
324.4	288.48	93,582.91	105,235.36	83,220.71
303.4	255.40	77,488.36	92,051.56	65,229.16
287.2	223.48	64,183.46	82,483.84	49,943.31
232.6	191.40	44,519.64	54,102.76	36,633.96
198.7	163.96	32,578.85	39,481.69	26,882.88
156.2	142.72	22,292.86	24,398.44	20,369.00
124.3	111.92	13,911.66	15,450.49	12,526.09
112.1	95.32	10,685.37	12,566.41	9,085.90
107.6	80.88	8,702.69	11,577.76	6,541.57
93.6	71.08	6,653.09	8,760.96	5,052.37
75.9	56.48	4,286.83	5,760.81	3,189.99
64.9	50.52	3,278.75	4,212.01	2,552.27
46.4	41.32	1,917.25	2,152.96	1,707.34
37.2	32.96	1,226.11	1,383.84	1,086.36
32.4	26.84	869.62	1,049.76	720.39

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	4612.60	4297.77	1128935.25	1179722.96	1098406.78

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
21,276,078.76	18,470,826.97	0.977

ตารางที่ ๑-4 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.65 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0	0.000	0.00	0
0.0029	0.2	55.3	0.138	40.40	0.101
0.0058	0.4	101.2	0.253	94.68	0.237
0.0088	0.6	161.5	0.404	144.56	0.361
0.0117	0.8	198.1	0.495	200.60	0.502
0.0146	1.0	287.2	0.718	288.76	0.722
0.0175	1.2	331.4	0.829	359.12	0.898
0.0204	1.4	348.0	0.870	400.00	1.000
0.0233	1.6	348.0	0.870	393.40	0.984
0.0263	1.8	339.6	0.849	343.28	0.858
0.0292	2.0	279.1	0.698	288.96	0.722
0.0321	2.2	212.3	0.531	243.64	0.609
0.0350	2.4	174.5	0.436	185.48	0.464
0.0379	2.6	130.1	0.325	143.12	0.358
0.0408	2.8	117.0	0.293	118.80	0.297
0.0438	3.0	102.7	0.257	95.56	0.239
0.0467	3.2	94.6	0.237	79.80	0.200
0.0496	3.4	82.7	0.207	71.48	0.179
0.0525	3.6	77.2	0.193	64.60	0.162
0.0554	3.8	75.3	0.188	57.20	0.143
0.0583	4.0	66.4	0.166	50.01	0.125
0.0613	4.2	59.3	0.148	40.92	0.102
0.0642	4.4	46.3	0.116	31.68	0.079
0.0671	4.6	39.5	0.099	30.52	0.076
0.0700	4.8	39.0	0.098	29.64	0.074
0.0729	5.0	39.5	0.099	31.20	0.078

ตารางที่ ๑-4 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.65 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
55.3	40.40	2,234.12	3,058.09	1,632.16
101.2	94.68	9,581.62	10,241.44	8,964.30
161.5	144.56	23,346.44	26,082.25	20,897.59
198.1	200.60	39,738.86	39,243.61	40,240.36
287.2	288.76	82,931.87	82,483.84	83,382.34
331.4	359.12	119,012.37	109,825.96	128,967.17
348.0	400.00	139,200.00	121,104.00	160,000.00
348.0	393.40	136,903.20	121,104.00	154,763.56
339.6	343.28	116,577.89	115,328.16	117,841.16
279.1	288.96	80,648.74	77,896.81	83,497.88
212.3	243.64	51,724.77	45,071.29	59,360.45
174.5	185.48	32,366.26	30,450.25	34,402.83
130.1	143.12	18,619.91	16,926.01	20,483.33
117.0	118.80	13,899.60	13,689.00	14,113.44
102.7	95.56	9,814.01	10,547.29	9,131.71
94.6	79.80	7,549.08	8,949.16	6,368.04
82.7	71.48	5,911.40	6,839.29	5,109.39
77.2	64.60	4,987.12	5,959.84	4,173.16
75.3	57.20	4,307.16	5,670.09	3,271.84
66.4	50.01	3,320.66	4,408.96	2,501.00
59.3	40.92	2,426.56	3,516.49	1,674.45
46.3	31.68	1,466.78	2,143.69	1,003.62
39.5	30.52	1,205.54	1,560.25	931.47
39.0	29.64	1,155.96	1,521.00	878.53
39.5	31.20	1,232.40	1,560.25	973.44

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	3,805.80	3,827.41	910,162.32	865,181.02	964,563.24

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
14,484,113.64	14,649,067.31	0.996

ตารางที่ ๑-5 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.70 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0	0.000	0.00	0.000
0.0029	0.2	55.3	0.138	50.88	0.127
0.0058	0.4	101.2	0.253	100.52	0.251
0.0088	0.6	161.5	0.404	156.96	0.392
0.0117	0.8	198.1	0.495	211.68	0.529
0.0146	1.0	287.2	0.718	280.68	0.702
0.0175	1.2	331.4	0.829	345.56	0.864
0.0204	1.4	348.0	0.870	400.00	1.000
0.0233	1.6	348.0	0.870	395.80	0.990
0.0263	1.8	339.6	0.849	343.36	0.858
0.0292	2.0	279.1	0.698	287.52	0.719
0.0321	2.2	212.3	0.531	225.56	0.564
0.0350	2.4	174.5	0.436	175.40	0.439
0.0379	2.6	130.1	0.325	135.76	0.339
0.0408	2.8	117.0	0.293	115.32	0.288
0.0438	3.0	102.7	0.257	96.48	0.241
0.0467	3.2	94.6	0.237	82.56	0.206
0.0496	3.4	82.7	0.207	71.12	0.178
0.0525	3.6	77.2	0.193	67.96	0.170
0.0554	3.8	75.3	0.188	63.48	0.159
0.0583	4.0	66.4	0.166	58.48	0.146
0.0613	4.2	59.3	0.148	55.08	0.138
0.0642	4.4	46.3	0.116	48.84	0.122
0.0671	4.6	39.5	0.099	45.20	0.113
0.0700	4.8	39.0	0.098	42.00	0.105
0.0729	5.0	39.5	0.099	40.80	0.102

ตารางที่ ๑-5 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.70 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
55.3	50.88	2,813.66	3,058.09	2,588.77
101.2	100.52	10,172.62	10,241.44	10,104.27
161.5	156.96	25,349.04	26,082.25	24,636.44
198.1	211.68	41,933.81	39,243.61	44,808.42
287.2	280.68	80,611.30	82,483.84	78,781.26
331.4	345.56	114,518.58	109,825.96	119,411.71
348.0	400.00	139,200.00	121,104.00	160,000.00
348.0	395.80	137,738.40	121,104.00	156,657.64
339.6	343.36	116,605.06	115,328.16	117,896.09
279.1	287.52	80,246.83	77,896.81	82,667.75
212.3	225.56	47,886.39	45,071.29	50,877.31
174.5	175.40	30,607.30	30,450.25	30,765.16
130.1	135.76	17,662.38	16,926.01	18,430.78
117.0	115.32	13,492.44	13,689.00	13,298.70
102.7	96.48	9,908.50	10,547.29	9,308.39
94.6	82.56	7,810.18	8,949.16	6,816.15
82.7	71.12	5,881.62	6,839.29	5,058.05
77.2	67.96	5,246.51	5,959.84	4,618.56
75.3	63.48	4,780.04	5,670.09	4,029.71
66.4	58.48	3,883.07	4,408.96	3,419.91
59.3	55.08	3,266.24	3,516.49	3,033.81
46.3	48.84	2,261.29	2,143.69	2,385.35
39.5	45.20	1,785.40	1,560.25	2,043.04
39.0	42.00	1,638.00	1,521.00	1,764.00
39.5	40.80	1,611.60	1,560.25	1,664.64

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	3,805.80	3,897.00	906,910.27	865,181.02	955,065.93

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
14,484,113.64	15,186,609.00	0.995

ตารางที่ ๑-6 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.79 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0.0	0.000	0.00	0
0.0029	0.2	55.3	0.138	38.84	0.097
0.0058	0.4	101.2	0.253	86.92	0.217
0.0088	0.6	161.5	0.404	139.24	0.348
0.0117	0.8	198.1	0.495	209.08	0.523
0.0146	1.0	287.2	0.718	284.72	0.712
0.0175	1.2	331.4	0.829	344.76	0.862
0.0204	1.4	348.0	0.870	400.00	1.000
0.0233	1.6	348.0	0.870	393.72	0.984
0.0263	1.8	339.6	0.849	352.96	0.882
0.0292	2.0	279.1	0.698	295.04	0.738
0.0321	2.2	212.3	0.531	239.44	0.599
0.0350	2.4	174.5	0.436	188.88	0.472
0.0379	2.6	130.1	0.325	143.32	0.358
0.0408	2.8	117.0	0.293	113.88	0.285
0.0438	3.0	102.7	0.257	91.60	0.229
0.0467	3.2	94.6	0.237	72.88	0.182
0.0496	3.4	82.7	0.207	59.64	0.149
0.0525	3.6	77.2	0.193	47.72	0.119
0.0554	3.8	75.3	0.188	39.44	0.099
0.0583	4.0	66.4	0.166	30.96	0.077
0.0613	4.2	59.3	0.148	25.40	0.064
0.0642	4.4	46.3	0.116	23.48	0.059
0.0671	4.6	39.5	0.099	21.52	0.054
0.0700	4.8	39.0	0.098	19.20	0.048
0.0729	5.0	39.5	0.099	18.76	0.047

ตารางที่ ๑-6 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S2 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.79 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
55.3	38.84	2,147.85	3,058.09	1,508.55
101.2	86.92	8,796.30	10,241.44	7,555.09
161.5	139.24	22,487.26	26,082.25	19,387.78
198.1	209.08	41,418.75	39,243.61	43,714.45
287.2	284.72	81,771.58	82,483.84	81,065.48
331.4	344.76	114,253.46	109,825.96	118,859.46
348.0	400.00	139,200.00	121,104.00	160,000.00
348.0	393.72	137,014.56	121,104.00	155,015.44
339.6	352.96	119,865.22	115,328.16	124,580.76
279.1	295.04	82,345.66	77,896.81	87,048.60
212.3	239.44	50,833.11	45,071.29	57,331.51
174.5	188.88	32,959.56	30,450.25	35,675.65
130.1	143.32	18,645.93	16,926.01	20,540.62
117.0	113.88	13,323.96	13,689.00	12,968.65
102.7	91.60	9,407.32	10,547.29	8,390.56
94.6	72.88	6,894.45	8,949.16	5,311.49
82.7	59.64	4,932.23	6,839.29	3,556.93
77.2	47.72	3,683.98	5,959.84	2,277.20
75.3	39.44	2,969.83	5,670.09	1,555.51
66.4	30.96	2,055.74	4,408.96	958.52
59.3	25.40	1,506.22	3,516.49	645.16
46.3	23.48	1,087.12	2,143.69	551.31
39.5	21.52	850.04	1,560.25	463.11
39.0	19.20	748.80	1,521.00	368.64
39.5	18.76	741.02	1,560.25	351.94

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	3,805.80	3,681.40	899,939.98	865,181.02	949,682.41

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
14,484,113.64	13,552,705.96	0.995

ตารางที่ ๑-7 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 3.10 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0	0.000	0.00	0.000
0.0042	0.2	48.1	0.120	43.20	0.108
0.0084	0.4	90.5	0.226	88.40	0.222
0.0126	0.6	112.5	0.281	144.80	0.363
0.0168	0.8	223.2	0.558	207.60	0.519
0.0210	1.0	274.8	0.687	264.80	0.663
0.0252	1.2	327.2	0.818	311.20	0.779
0.0294	1.4	330.3	0.826	351.84	0.880
0.0336	1.6	357.8	0.895	387.08	0.968
0.0378	1.8	357.1	0.893	399.88	1.000
0.0420	2.0	369.7	0.924	385.08	0.963
0.0462	2.2	348.4	0.871	358.52	0.896
0.0504	2.4	314.1	0.785	332.52	0.831
0.0546	2.6	309.8	0.775	305.36	0.763
0.0588	2.8	287.4	0.719	275.80	0.690
0.0630	3.0	258.4	0.646	251.88	0.630
0.0672	3.2	226.3	0.566	223.36	0.558
0.0714	3.4	190.7	0.477	193.80	0.485
0.0756	3.6	182.9	0.457	168.84	0.422
0.0798	3.8	152.6	0.382	145.68	0.364
0.0840	4.0	118.2	0.296	113.92	0.285
0.0882	4.2	92.3	0.231	95.60	0.239
0.0924	4.4	63.5	0.159	68.04	0.170
0.0966	4.6	59.6	0.149	55.88	0.140
0.1008	4.8	49.1	0.123	40.76	0.102
0.1050	5.0	48.9	0.122	39.88	0.100

ตารางที่ ๑-7 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 3.10 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
48.1	43.20	2,077.92	2,313.61	1,866.24
90.5	88.40	8,000.20	8,190.25	7,814.56
112.5	144.80	16,290.00	12,656.25	20,967.04
223.2	207.60	46,336.32	49,818.24	43,097.76
274.8	264.80	72,767.04	75,515.04	70,119.04
327.2	311.20	101,824.64	107,059.84	96,845.44
330.3	351.84	116,212.75	109,098.09	123,791.39
357.8	387.08	138,497.22	128,020.84	149,830.93
357.1	399.88	142,797.15	127,520.41	159,904.01
369.7	385.08	142,364.08	136,678.09	148,286.61
348.4	358.52	124,908.37	121,382.56	128,536.59
314.1	332.52	104,444.53	98,658.81	110,569.55
309.8	305.36	94,600.53	95,976.04	93,244.73
287.4	275.80	79,264.92	82,598.76	76,065.64
258.4	251.88	65,085.79	66,770.56	63,443.53
226.3	223.36	50,546.37	51,211.69	49,889.69
190.7	193.80	36,957.66	36,366.49	37,558.44
182.9	168.84	30,880.84	33,452.41	28,506.95
152.6	145.68	22,230.77	23,286.76	21,222.66
118.2	113.92	13,465.34	13,971.24	12,977.77
92.3	95.60	8,823.88	8,519.29	9,139.36
63.5	68.04	4,320.54	4,032.25	4,629.44
59.6	55.88	3,330.45	3,552.16	3,122.57
49.1	40.76	2,001.32	2,410.81	1,661.38
48.9	39.88	1,950.13	2,391.21	1,590.41

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	5,193.40	5,253.72	1,429,978.75	1,401,451.70	1,464,681.73

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
26,971,403.56	27,601,573.84	0.993

ตารางที่ ๑-8 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 3.60 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C ₀ โมเดล
0.0000	0	0	0.000	0.00	0.000
0.0042	0.2	48.1	0.120	50.44	0.126
0.0084	0.4	90.5	0.226	87.76	0.219
0.0126	0.6	112.5	0.281	138.44	0.346
0.0168	0.8	223.2	0.558	199.04	0.498
0.0210	1.0	274.8	0.687	257.20	0.643
0.0252	1.2	327.2	0.818	305.92	0.765
0.0294	1.4	330.3	0.826	352.60	0.882
0.0336	1.6	357.8	0.895	387.80	0.970
0.0378	1.8	357.1	0.893	400.00	1.000
0.0420	2.0	369.7	0.924	383.28	0.958
0.0462	2.2	348.4	0.871	357.92	0.895
0.0504	2.4	314.1	0.785	329.88	0.825
0.0546	2.6	309.8	0.775	303.44	0.759
0.0588	2.8	287.4	0.719	279.00	0.698
0.0630	3.0	258.4	0.646	249.60	0.624
0.0672	3.2	226.3	0.566	224.48	0.561
0.0714	3.4	190.7	0.477	199.28	0.498
0.0756	3.6	182.9	0.457	176.56	0.441
0.0798	3.8	152.6	0.382	153.44	0.384
0.0840	4.0	118.2	0.296	129.36	0.323
0.0882	4.2	92.3	0.231	93.28	0.233
0.0924	4.4	63.5	0.159	75.00	0.188
0.0966	4.6	59.6	0.149	52.64	0.132
0.1008	4.8	49.1	0.123	47.72	0.119
0.1050	5.0	48.9	0.122	39.40	0.099

ตารางที่ ๑-8 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 3.60 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
48.1	50.44	2,426.16	2,313.61	2,544.19
90.5	87.76	7,942.28	8,190.25	7,701.82
112.5	138.44	15,574.50	12,656.25	19,165.63
223.2	199.04	44,425.73	49,818.24	39,616.92
274.8	257.20	70,678.56	75,515.04	66,151.84
327.2	305.92	100,097.02	107,059.84	93,587.05
330.3	352.60	116,463.78	109,098.09	124,326.76
357.8	387.80	138,754.84	128,020.84	150,388.84
357.1	400.00	142,840.00	127,520.41	160,000.00
369.7	383.28	141,698.62	136,678.09	146,903.56
348.4	357.92	124,699.33	121,382.56	128,106.73
314.1	329.88	103,615.31	98,658.81	108,820.81
309.8	303.44	94,005.71	95,976.04	92,075.83
287.4	279.00	80,184.60	82,598.76	77,841.00
258.4	249.60	64,496.64	66,770.56	62,300.16
226.3	224.48	50,799.82	51,211.69	50,391.27
190.7	199.28	38,002.70	36,366.49	39,712.52
182.9	176.56	32,292.82	33,452.41	31,173.43
152.6	153.44	23,414.94	23,286.76	23,543.83
118.2	129.36	15,290.35	13,971.24	16,734.01
92.3	93.28	8,609.74	8,519.29	8,701.16
63.5	75.00	4,762.50	4,032.25	5,625.00
59.6	52.64	3,137.34	3,552.16	2,770.97
49.1	47.72	2,343.05	2,410.81	2,277.20
48.9	39.40	1,926.66	2,391.21	1,552.36

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	5,193.40	5,273.48	1,428,483.02	1,401,451.70	1,462,012.90

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
26,971,403.56	27,809,591.31	0.992

ตารางที่ ๑-9 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.53 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0	0.000	0.00	0.000
0.0042	0.2	48.1	0.120	40.88	0.102
0.0084	0.4	90.5	0.226	86.16	0.215
0.0126	0.6	112.5	0.281	136.96	0.342
0.0168	0.8	223.2	0.558	198.44	0.496
0.0210	1.0	274.8	0.687	258.64	0.647
0.0252	1.2	327.2	0.818	305.12	0.763
0.0294	1.4	330.3	0.826	354.64	0.887
0.0336	1.6	357.8	0.895	392.60	0.982
0.0378	1.8	357.1	0.893	400.00	1.000
0.0420	2.0	369.7	0.924	382.64	0.957
0.0462	2.2	348.4	0.871	364.92	0.912
0.0504	2.4	314.1	0.785	333.60	0.834
0.0546	2.6	309.8	0.775	296.88	0.742
0.0588	2.8	287.4	0.719	267.96	0.670
0.0630	3.0	258.4	0.646	238.72	0.597
0.0672	3.2	226.3	0.566	211.08	0.528
0.0714	3.4	190.7	0.477	183.76	0.459
0.0756	3.6	182.9	0.457	159.48	0.399
0.0798	3.8	152.6	0.382	136.64	0.342
0.0840	4.0	118.2	0.296	117.80	0.295
0.0882	4.2	92.3	0.231	99.12	0.248
0.0924	4.4	63.5	0.159	74.56	0.186
0.0966	4.6	59.6	0.149	63.32	0.158
0.1008	4.8	49.1	0.123	56.80	0.142
0.1050	5.0	48.9	0.122	47.96	0.120

ตารางที่ ๑-๑ การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.53 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
48.1	40.88	1,966.33	2,313.61	1,671.17
90.5	86.16	7,797.48	8,190.25	7,423.55
112.5	136.96	15,408.00	12,656.25	18,758.04
223.2	198.44	44,291.81	49,818.24	39,378.43
274.8	258.64	71,074.27	75,515.04	66,894.65
327.2	305.12	99,835.26	107,059.84	93,098.21
330.3	354.64	117,137.59	109,098.09	125,769.53
357.8	392.60	140,472.28	128,020.84	154,134.76
357.1	400.00	142,840.00	127,520.41	160,000.00
369.7	382.64	141,462.01	136,678.09	146,413.37
348.4	364.92	127,138.13	121,382.56	133,166.61
314.1	333.60	104,783.76	98,658.81	111,288.96
309.8	296.88	91,973.42	95,976.04	88,137.73
287.4	267.96	77,011.70	82,598.76	71,802.56
258.4	238.72	61,685.25	66,770.56	56,987.24
226.3	211.08	47,767.40	51,211.69	44,554.77
190.7	183.76	35,043.03	36,366.49	33,767.74
182.9	159.48	29,168.89	33,452.41	25,433.87
152.6	136.64	20,851.26	23,286.76	18,670.49
118.2	117.80	13,923.96	13,971.24	13,876.84
92.3	99.12	9,148.78	8,519.29	9,824.77
63.5	74.56	4,734.56	4,032.25	5,559.19
59.6	63.32	3,773.87	3,552.16	4,009.42
49.1	56.80	2,788.88	2,410.81	3,226.24
48.9	47.96	2,345.24	2,391.21	2,300.16

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	5,193.40	5,208.68	1,414,423.18	1,401,451.70	1,436,148.32

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
26,971,403.56	27,130,347.34	0.988

ตารางที่ ๑-10 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.85 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0.0	0.000	0.00	0.000
0.0028	0.2	48.8	0.122	47.24	0.118
0.0056	0.4	134.3	0.336	120.92	0.302
0.0084	0.6	245.2	0.613	211.36	0.528
0.0112	0.8	303.2	0.758	288.64	0.722
0.0140	1.0	317.6	0.794	337.64	0.844
0.0168	1.2	337.2	0.843	375.68	0.939
0.0196	1.4	377.2	0.943	394.00	0.985
0.0224	1.6	379.8	0.950	400.00	1.000
0.0252	1.8	382.1	0.955	388.44	0.971
0.0280	2.0	369.7	0.924	364.56	0.911
0.0308	2.2	328.4	0.821	334.48	0.836
0.0336	2.4	291.4	0.729	305.80	0.765
0.0364	2.6	279.8	0.700	277.16	0.693
0.0392	2.8	259.1	0.648	239.08	0.598
0.0420	3.0	218.4	0.546	203.92	0.510
0.0448	3.2	177.3	0.443	171.44	0.429
0.0476	3.4	141.7	0.354	144.00	0.360
0.0504	3.6	122.9	0.307	122.88	0.307
0.0532	3.8	102.6	0.257	100.68	0.252
0.0560	4.0	92.1	0.230	81.04	0.203
0.0588	4.2	59.3	0.148	65.20	0.163
0.0616	4.4	57.5	0.144	51.20	0.128
0.0644	4.6	54.6	0.137	46.28	0.116
0.0672	4.8	47.1	0.118	43.96	0.110
0.0700	5.0	45.9	0.115	41.12	0.103

ตารางที่ ๑-10 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.85 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
48.8	47.24	2,305.31	2,381.44	2,231.62
134.3	120.92	16,239.56	18,036.49	14,621.65
245.2	211.36	51,825.47	60,123.04	44,673.05
303.2	288.64	87,515.65	91,930.24	83,313.05
317.6	337.64	107,234.46	100,869.76	114,000.77
337.2	375.68	126,679.30	113,703.84	141,135.46
377.2	394.00	148,616.80	142,279.84	155,236.00
379.8	400.00	151,920.00	144,248.04	160,000.00
382.1	388.44	148,422.92	146,000.41	150,885.63
369.7	364.56	134,777.83	136,678.09	132,903.99
328.4	334.48	109,843.23	107,846.56	111,876.87
291.4	305.80	89,110.12	84,913.96	93,513.64
279.8	277.16	77,549.37	78,288.04	76,817.67
259.1	239.08	61,945.63	67,132.81	57,159.25
218.4	203.92	44,536.13	47,698.56	41,583.37
177.3	171.44	30,396.31	31,435.29	29,391.67
141.7	144.00	20,404.80	20,078.89	20,736.00
122.9	122.88	15,101.95	15,104.41	15,099.49
102.6	100.68	10,329.77	10,526.76	10,136.46
92.1	81.04	7,463.78	8,482.41	6,567.48
59.3	65.20	3,866.36	3,516.49	4,251.04
57.5	51.20	2,944.00	3,306.25	2,621.44
54.6	46.28	2,526.89	2,981.16	2,141.84
47.1	43.96	2,070.52	2,218.41	1,932.48
45.9	41.12	1,887.41	2,106.81	1,690.85

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	5,173.20	5,156.72	1,455,513.57	1,441,888.00	1,474,520.78

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
26,761,998.24	26,591,761.16	0.994

ตารางที่ ๑-11 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.90 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0.0	0.000	0.00	0.000
0.0028	0.2	48.8	0.122	52.00	0.130
0.0056	0.4	134.3	0.336	134.84	0.337
0.0084	0.6	245.2	0.613	224.60	0.562
0.0112	0.8	303.2	0.758	289.12	0.723
0.0140	1.0	317.6	0.794	327.68	0.819
0.0168	1.2	337.2	0.843	361.76	0.904
0.0196	1.4	377.2	0.943	387.40	0.969
0.0224	1.6	379.8	0.950	400.00	1.000
0.0252	1.8	382.1	0.955	386.24	0.966
0.0280	2.0	369.7	0.924	363.28	0.908
0.0308	2.2	328.4	0.821	325.12	0.815
0.0336	2.4	291.4	0.729	295.00	0.748
0.0364	2.6	279.8	0.700	271.48	0.670
0.0392	2.8	259.1	0.648	247.36	0.605
0.0420	3.0	218.4	0.546	216.60	0.542
0.0448	3.2	177.3	0.443	180.00	0.450
0.0476	3.4	141.7	0.354	144.88	0.362
0.0504	3.6	122.9	0.307	117.08	0.293
0.0532	3.8	102.6	0.257	95.16	0.238
0.0560	4.0	92.1	0.230	75.48	0.189
0.0588	4.2	59.3	0.148	61.24	0.153
0.0616	4.4	57.5	0.144	51.92	0.130
0.0644	4.6	54.6	0.137	45.76	0.114
0.0672	4.8	47.1	0.118	44.00	0.110
0.0700	5.0	45.9	0.115	43.52	0.109

ตารางที่ ๑-11 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.90 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
48.8	52.00	2,537.60	2,381.44	2,704.00
134.3	134.84	18,109.01	18,036.49	18,181.83
245.2	224.60	55,071.92	60,123.04	50,445.16
303.2	289.12	87,661.18	91,930.24	83,590.37
317.6	327.68	104,071.17	100,869.76	107,374.18
337.2	361.76	121,985.47	113,703.84	130,870.30
377.2	387.40	146,127.28	142,279.84	150,078.76
379.8	400.00	151,920.00	144,248.04	160,000.00
382.1	386.24	147,582.30	146,000.41	149,181.34
369.7	363.28	134,304.62	136,678.09	131,972.36
328.4	325.12	106,769.41	107,846.56	105,703.01
291.4	295.00	85,963.00	84,913.96	87,025.00
279.8	271.48	75,960.10	78,288.04	73,701.39
259.1	247.36	64,090.98	67,132.81	61,186.97
218.4	216.60	47,305.44	47,698.56	46,915.56
177.3	180.00	31,914.00	31,435.29	32,400.00
141.7	144.88	20,529.50	20,078.89	20,990.21
122.9	117.08	14,389.13	15,104.41	13,707.73
102.6	95.16	9,763.42	10,526.76	9,055.43
92.1	75.48	6,951.71	8,482.41	5,697.23
59.3	61.24	3,631.53	3,516.49	3,750.34
57.5	51.92	2,985.40	3,306.25	2,695.69
54.6	45.76	2,498.50	2,981.16	2,093.98
47.1	44.00	2,072.40	2,218.41	1,936.00
45.9	43.52	1,997.57	2,106.81	1,893.99

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	5,173.20	5,141.52	1,446,192.63	1,441,888.00	1,453,150.82

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
26,761,998.24	26,435,227.91	0.997

ตารางที่ ๑-12 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.94 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0.0	0.000	0.00	0.000
0.0028	0.2	48.8	0.122	48.84	0.122
0.0056	0.4	134.3	0.336	112.56	0.281
0.0084	0.6	245.2	0.613	185.80	0.465
0.0112	0.8	303.2	0.758	267.84	0.670
0.0140	1.0	317.6	0.794	327.48	0.819
0.0168	1.2	337.2	0.843	361.92	0.905
0.0196	1.4	377.2	0.943	387.00	0.968
0.0224	1.6	379.8	0.950	400.00	1.000
0.0252	1.8	382.1	0.955	385.40	0.964
0.0280	2.0	369.7	0.924	353.88	0.885
0.0308	2.2	328.4	0.821	317.40	0.794
0.0336	2.4	291.4	0.729	281.76	0.704
0.0364	2.6	279.8	0.700	250.36	0.626
0.0392	2.8	259.1	0.648	223.08	0.558
0.0420	3.0	218.4	0.546	192.48	0.481
0.0448	3.2	177.3	0.443	166.52	0.416
0.0476	3.4	141.7	0.354	140.48	0.351
0.0504	3.6	122.9	0.307	115.40	0.289
0.0532	3.8	102.6	0.257	97.84	0.245
0.0560	4.0	92.1	0.230	75.80	0.190
0.0588	4.2	59.3	0.148	62.04	0.155
0.0616	4.4	57.5	0.144	49.48	0.124
0.0644	4.6	54.6	0.137	41.52	0.104
0.0672	4.8	47.1	0.118	38.20	0.096
0.0700	5.0	45.9	0.115	37.60	0.094

ตารางที่ ๑-12 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S3 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 4.94 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
48.8	48.84	2,383.39	2,381.44	2,385.35
134.3	112.56	15,116.81	18,036.49	12,669.75
245.2	185.80	45,558.16	60,123.04	34,521.64
303.2	267.84	81,209.09	91,930.24	71,738.27
317.6	327.48	104,007.65	100,869.76	107,243.15
337.2	361.92	122,039.42	113,703.84	130,986.09
377.2	387.00	145,976.40	142,279.84	149,769.00
379.8	400.00	151,920.00	144,248.04	160,000.00
382.1	385.40	147,261.34	146,000.41	148,533.16
369.7	353.88	130,829.44	136,678.09	125,231.05
328.4	317.40	104,234.16	107,846.56	100,742.76
291.4	281.76	82,104.86	84,913.96	79,388.70
279.8	250.36	70,050.73	78,288.04	62,680.13
259.1	223.08	57,800.03	67,132.81	49,764.69
218.4	192.48	42,037.63	47,698.56	37,048.55
177.3	166.52	29,524.00	31,435.29	27,728.91
141.7	140.48	19,906.02	20,078.89	19,734.63
122.9	115.40	14,182.66	15,104.41	13,317.16
102.6	97.84	10,038.38	10,526.76	9,572.67
92.1	75.80	6,981.18	8,482.41	5,745.64
59.3	62.04	3,678.97	3,516.49	3,848.96
57.5	49.48	2,845.10	3,306.25	2,448.27
54.6	41.52	2,266.99	2,981.16	1,723.91
47.1	38.20	1,799.22	2,218.41	1,459.24
45.9	37.60	1,725.84	2,106.81	1,413.76

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	5,173.20	4,920.68	1,395,477.47	1,441,888.00	1,359,695.43

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
26,761,998.24	24,213,091.66	0.990

ตารางที่ ๑-13 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.20 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0.0	0.000	0.00	0.000
0.0042	0.2	12.9	0.032	14.84	0.037
0.0084	0.4	51.3	0.128	49.12	0.123
0.0126	0.6	108.1	0.270	114.08	0.285
0.0168	0.8	216.3	0.541	186.76	0.467
0.0210	1.0	249.7	0.624	250.12	0.625
0.0252	1.2	277.1	0.693	297.64	0.744
0.0295	1.4	293.9	0.735	335.36	0.838
0.0337	1.6	319.4	0.799	361.28	0.903
0.0379	1.8	330.2	0.826	383.80	0.960
0.0421	2.0	338.1	0.845	398.64	0.997
0.0463	2.2	354.5	0.886	400.00	1.000
0.0505	2.4	358.6	0.897	368.88	0.922
0.0547	2.6	327.4	0.819	336.00	0.840
0.0589	2.8	289.2	0.723	296.84	0.742
0.0631	3.0	254.8	0.637	251.52	0.629
0.0673	3.2	197.5	0.494	206.92	0.517
0.0715	3.4	149.2	0.373	159.64	0.399
0.0757	3.6	132.4	0.331	125.96	0.315
0.0800	3.8	102.1	0.255	105.28	0.263
0.0842	4.0	89.2	0.223	86.68	0.217
0.0884	4.2	65.2	0.163	71.44	0.179
0.0926	4.4	58.3	0.146	62.64	0.157
0.0968	4.6	51.3	0.128	51.16	0.128
0.1010	4.8	47.4	0.119	46.68	0.117
0.1052	5.0	41.2	0.103	41.12	0.103

ตารางที่ ๑-13 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.20 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
12.9	14.84	191.44	166.41	220.23
51.3	49.12	2,519.86	2,631.69	2,412.77
108.1	114.08	12,332.05	11,685.61	13,014.25
216.3	186.76	40,396.19	46,785.69	34,879.30
249.7	250.12	62,454.96	62,350.09	62,560.01
277.1	297.64	82,476.04	76,784.41	88,589.57
293.9	335.36	98,562.30	86,377.21	112,466.33
319.4	361.28	115,392.83	102,016.36	130,523.24
330.2	383.80	126,730.76	109,032.04	147,302.44
338.1	398.64	134,780.18	114,311.61	158,913.85
354.5	400.00	141,800.00	125,670.25	160,000.00
358.6	368.88	132,280.37	128,593.96	136,072.45
327.4	336.00	110,006.40	107,190.76	112,896.00
289.2	296.84	85,846.13	83,636.64	88,113.99
254.8	251.52	64,087.30	64,923.04	63,262.31
197.5	206.92	40,866.70	39,006.25	42,815.89
149.2	159.64	23,818.29	22,260.64	25,484.93
132.4	125.96	16,677.10	17,529.76	15,865.92
102.1	105.28	10,749.09	10,424.41	11,083.88
89.2	86.68	7,731.86	7,956.64	7,513.42
65.2	71.44	4,657.89	4,251.04	5,103.67
58.3	62.64	3,651.91	3,398.89	3,923.77
51.3	51.16	2,624.51	2,631.69	2,617.35
47.4	46.68	2,212.63	2,246.76	2,179.02
41.2	41.12	1,694.14	1,697.44	1,690.85

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	4,715.30	5,002.40	1,324,540.93	1,233,559.29	1,429,505.44

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
22,294,054.09	25,044,005.76	0.997

ตารางที่ ๑-14 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.25 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0.0	0.000	0.00	0.000
0.0042	0.2	12.9	0.032	21.68	0.054
0.0084	0.4	51.3	0.128	58.84	0.147
0.0126	0.6	108.1	0.270	105.28	0.263
0.0168	0.8	216.3	0.541	168.72	0.422
0.0210	1.0	249.7	0.624	228.76	0.572
0.0252	1.2	277.1	0.693	273.88	0.685
0.0295	1.4	293.9	0.735	316.44	0.791
0.0337	1.6	319.4	0.799	351.28	0.878
0.0379	1.8	330.2	0.826	377.64	0.944
0.0421	2.0	338.1	0.845	395.84	0.990
0.0463	2.2	354.5	0.886	400.00	1.000
0.0505	2.4	358.6	0.897	376.88	0.942
0.0547	2.6	327.4	0.819	342.00	0.855
0.0589	2.8	289.2	0.723	298.92	0.747
0.0631	3.0	254.8	0.637	253.88	0.635
0.0673	3.2	197.5	0.494	208.92	0.522
0.0715	3.4	149.2	0.373	167.68	0.419
0.0757	3.6	132.4	0.331	137.76	0.344
0.0800	3.8	102.1	0.255	111.24	0.278
0.0842	4.0	89.2	0.223	91.60	0.229
0.0884	4.2	65.2	0.163	78.44	0.196
0.0926	4.4	58.3	0.146	59.28	0.148
0.0968	4.6	51.3	0.128	54.04	0.135
0.1010	4.8	47.4	0.119	47.32	0.118
0.1052	5.0	41.2	0.103	38.80	0.097

ตารางที่ ๑-14 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.25 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
12.9	21.68	279.67	166.41	470.02
51.3	58.84	3,018.49	2,631.69	3,462.15
108.1	105.28	11,380.77	11,685.61	11,083.88
216.3	168.72	36,494.14	46,785.69	28,466.44
249.7	228.76	57,121.37	62,350.09	52,331.14
277.1	273.88	75,892.15	76,784.41	75,010.25
293.9	316.44	93,001.72	86,377.21	100,134.27
319.4	351.28	112,198.83	102,016.36	123,397.64
330.2	377.64	124,696.73	109,032.04	142,611.97
338.1	395.84	133,833.50	114,311.61	156,689.31
354.5	400.00	141,800.00	125,670.25	160,000.00
358.6	376.88	135,149.17	128,593.96	142,038.53
327.4	342.00	111,970.80	107,190.76	116,964.00
289.2	298.92	86,447.66	83,636.64	89,353.17
254.8	253.88	64,688.62	64,923.04	64,455.05
197.5	208.92	41,261.70	39,006.25	43,647.57
149.2	167.68	25,017.86	22,260.64	28,116.58
132.4	137.76	18,239.42	17,529.76	18,977.82
102.1	111.24	11,357.60	10,424.41	12,374.34
89.2	91.60	8,170.72	7,956.64	8,390.56
65.2	78.44	5,114.29	4,251.04	6,152.83
58.3	59.28	3,456.02	3,398.89	3,514.12
51.3	54.04	2,772.25	2,631.69	2,920.32
47.4	47.32	2,242.97	2,246.76	2,239.18
41.2	38.80	1,598.56	1,697.44	1,505.44

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	4,715.30	4,965.12	1,307,205.02	1,233,559.29	1,394,306.58

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
22,234,054.09	24,767,416.61	0.995

ตารางที่ ๑-15 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.32 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0.0	0.000	0.00	0.0000
0.0042	0.2	12.9	0.032	27.56	0.0689
0.0084	0.4	51.3	0.128	67.08	0.1677
0.0126	0.6	108.1	0.270	109.04	0.2726
0.0168	0.8	216.3	0.541	161.00	0.4025
0.0210	1.0	249.7	0.624	212.56	0.5314
0.0252	1.2	277.1	0.693	264.60	0.6615
0.0295	1.4	293.9	0.735	310.88	0.7772
0.0337	1.6	319.4	0.799	347.32	0.8683
0.0379	1.8	330.2	0.826	375.80	0.9395
0.0421	2.0	338.1	0.845	393.04	0.9826
0.0463	2.2	354.5	0.886	400.00	1.0000
0.0505	2.4	358.6	0.897	369.08	0.9227
0.0547	2.6	327.4	0.819	331.00	0.8275
0.0589	2.8	289.2	0.723	299.36	0.7484
0.0631	3.0	254.8	0.637	254.88	0.6372
0.0673	3.2	197.5	0.494	203.72	0.5093
0.0715	3.4	149.2	0.373	164.72	0.4118
0.0757	3.6	132.4	0.331	131.72	0.3293
0.0800	3.8	102.1	0.255	106.16	0.2654
0.0842	4.0	89.2	0.223	87.48	0.2187
0.0884	4.2	65.2	0.163	67.84	0.1696
0.0926	4.4	58.3	0.146	54.72	0.1368
0.0968	4.6	51.3	0.128	41.68	0.1042
0.1010	4.8	47.4	0.119	36.44	0.0911
0.1052	5.0	41.2	0.103	32.80	0.0820

ตารางที่ ๑-15 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.32 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
12.9	27.56	355.52	166.41	759.55
51.3	67.08	3,441.20	2,631.69	4,499.73
108.1	109.04	11,787.22	11,685.61	11,889.72
216.3	161.00	34,824.30	46,785.69	25,921.00
249.7	212.56	53,076.23	62,350.09	45,181.75
277.1	264.60	73,320.66	76,784.41	70,013.16
293.9	310.88	91,367.63	86,377.21	96,646.37
319.4	347.32	110,934.01	102,016.36	120,631.18
330.2	375.80	124,089.16	109,032.04	141,225.64
338.1	393.04	132,886.82	114,311.61	154,480.44
354.5	400.00	141,800.00	125,670.25	160,000.00
358.6	369.08	132,352.09	128,593.96	136,220.05
327.4	331.00	108,369.40	107,190.76	109,561.00
289.2	299.36	86,574.91	83,636.64	89,616.41
254.8	254.88	64,943.42	64,923.04	64,963.81
197.5	203.72	40,234.70	39,006.25	41,501.84
149.2	164.72	24,576.22	22,260.64	27,132.68
132.4	131.72	17,439.73	17,529.76	17,350.16
102.1	106.16	10,838.94	10,424.41	11,269.95
89.2	87.48	7,803.22	7,956.64	7,652.75
65.2	67.84	4,423.17	4,251.04	4,602.27
58.3	54.72	3,190.18	3,398.89	2,994.28
51.3	41.68	2,138.18	2,631.69	1,737.22
47.4	36.44	1,727.26	2,246.76	1,327.87
41.2	32.80	1,351.36	1,697.44	1,075.84

n	$\sum x$	$\sum y$	$\sum(xy)$	$\sum(x)^2$	$\sum(y)^2$
25	4,715.30	4,850.48	1,283,845.54	1,233,559.29	1,348,254.68

$(\sum x)^2$	$(\sum y)^2$	r
22,334,054.09	23,557,156.23	0.993

ตารางที่ ๑-16 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.50 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0.0	0.000	0.00	0.000
0.0028	0.2	28.5	0.071	30.80	0.077
0.0056	0.4	62.2	0.156	67.60	0.169
0.0084	0.6	135.7	0.339	129.60	0.324
0.0112	0.8	228.7	0.572	207.20	0.518
0.0140	1.0	278.3	0.696	267.60	0.669
0.0168	1.2	295.9	0.740	312.40	0.781
0.0196	1.4	307.0	0.768	352.80	0.882
0.0224	1.6	321.0	0.803	381.19	0.953
0.0253	1.8	370.4	0.926	400.00	1.000
0.0281	2.0	361.3	0.903	386.80	0.967
0.0309	2.2	354.7	0.887	361.60	0.904
0.0337	2.4	325.5	0.814	328.80	0.822
0.0365	2.6	302.4	0.756	284.80	0.712
0.0393	2.8	256.5	0.641	256.40	0.641
0.0421	3.0	224.2	0.561	221.60	0.554
0.0449	3.2	197.5	0.494	187.60	0.469
0.0477	3.4	153.3	0.383	196.00	0.390
0.0505	3.6	118.6	0.297	122.00	0.305
0.0533	3.8	107.9	0.270	98.80	0.247
0.0561	4.0	82.8	0.207	80.80	0.202
0.0589	4.2	71.8	0.180	63.60	0.159
0.0617	4.4	59.3	0.148	50.80	0.127
0.0645	4.6	41.2	0.103	43.60	0.109
0.0673	4.8	36.4	0.091	38.80	0.097
0.0701	5.0	34.1	0.085	36.40	0.091

ตารางที่ ๑-16 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.50 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
28.5	30.80	877.80	812.25	948.64
62.2	67.60	4,204.72	3,868.84	4,569.76
135.7	129.60	17,586.72	18,414.49	16,796.16
228.7	207.20	47,386.64	52,303.69	42,931.84
278.3	267.60	74,473.08	77,450.89	71,609.76
295.9	312.40	92,439.16	87,556.81	97,593.76
307.0	352.80	108,309.60	94,249.00	124,467.84
321.0	381.19	122,361.99	103,041.00	145,305.82
370.4	400.00	148,160.00	137,196.16	160,000.00
361.3	386.80	139,750.84	130,537.69	149,614.24
354.7	361.60	128,259.52	125,812.09	130,754.56
325.5	328.80	107,024.40	105,950.25	108,109.44
302.4	284.80	86,123.52	91,445.76	81,111.04
256.5	256.40	65,766.60	65,792.25	65,740.96
224.2	221.60	49,682.72	50,265.64	49,106.56
197.5	187.60	37,051.00	39,006.25	35,193.76
153.3	196.00	30,046.80	23,500.89	38,416.00
118.6	122.00	14,469.20	14,065.96	14,884.00
107.9	98.80	10,660.52	11,642.41	9,761.44
82.8	80.80	6,690.24	6,855.84	6,528.64
71.8	63.60	4,566.48	5,155.24	4,044.96
59.3	50.80	3,012.44	3,516.49	2,580.64
41.2	43.60	1,796.32	1,697.44	1,900.96
36.4	38.80	1,412.32	1,324.96	1,505.44
34.1	36.40	1,241.24	1,162.81	1,324.96

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	4,755.20	4,907.59	1,303,353.87	1,252,625.10	1,364,801.18

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
22,687,927.04	24,104,439.61	0.995

ตารางที่ ๑-17 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.57 เซนติเมตร

Time Step		ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
(day)	Pore Volume	mg/l (x)	C/C ₀ LAB	mg/l (y)	C/C ₀ โมเดล
0.0000	0	0.0	0.000	0.00	0.000
0.0028	0.2	28.5	0.071	31.60	0.079
0.0056	0.4	62.2	0.156	74.40	0.186
0.0084	0.6	135.7	0.339	121.60	0.304
0.0112	0.8	228.7	0.572	228.40	0.501
0.0140	1.0	278.3	0.696	248.00	0.643
0.0168	1.2	295.9	0.740	300.40	0.751
0.0196	1.4	307.0	0.768	339.20	0.848
0.0224	1.6	321.0	0.803	376.00	0.940
0.0253	1.8	370.4	0.926	400.00	1.000
0.0281	2.0	361.3	0.903	389.60	0.974
0.0309	2.2	354.7	0.887	360.00	0.900
0.0337	2.4	325.5	0.814	324.40	0.811
0.0365	2.6	302.4	0.756	287.60	0.719
0.0393	2.8	256.5	0.641	246.80	0.617
0.0421	3.0	224.2	0.561	208.00	0.520
0.0449	3.2	197.5	0.494	174.80	0.437
0.0477	3.4	153.3	0.383	144.80	0.362
0.0505	3.6	118.6	0.297	120.80	0.302
0.0533	3.8	107.9	0.270	100.40	0.251
0.0561	4.0	82.8	0.207	81.60	0.204
0.0589	4.2	71.8	0.180	64.40	0.161
0.0617	4.4	59.3	0.148	52.40	0.131
0.0645	4.6	41.2	0.103	45.20	0.113
0.0673	4.8	36.4	0.091	39.60	0.099
0.0701	5.0	34.1	0.085	32.00	0.080

ตารางที่ ๑-17 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.57 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
28.5	31.60	900.60	812.25	998.56
62.2	74.40	4,627.68	3,868.84	5,535.36
135.7	121.60	16,501.12	18,414.49	14,786.56
228.7	228.40	52,235.08	52,303.69	52,166.56
278.3	248.00	69,018.40	77,450.89	61,504.00
295.9	300.40	88,888.36	87,556.81	90,240.16
307.0	339.20	104,134.40	94,249.00	115,056.64
321.0	376.00	120,696.00	103,041.00	141,376.00
370.4	400.00	148,160.00	137,196.16	160,000.00
361.3	389.60	140,762.48	130,537.69	151,788.16
354.7	360.00	127,692.00	125,812.09	129,600.00
325.5	324.40	105,592.20	105,950.25	105,235.36
302.4	287.60	86,970.24	91,445.76	82,713.76
256.5	246.80	63,304.20	65,792.25	60,910.24
224.2	208.00	46,633.60	50,265.64	43,264.00
197.5	174.80	34,523.00	39,006.25	30,555.04
153.3	144.80	22,197.84	23,500.89	20,967.04
118.6	120.80	14,326.88	14,065.96	14,592.64
107.9	100.40	10,833.16	11,642.41	10,080.16
82.8	81.60	6,756.48	6,855.84	6,658.56
71.8	64.40	4,623.92	5,155.24	4,147.36
59.3	52.40	3,107.32	3,516.49	2,745.76
41.2	45.20	1,862.24	1,697.44	2,043.04
36.4	39.60	1,441.44	1,324.96	1,568.16
34.1	32.00	1,091.20	1,162.81	1,024.00

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	4,755.20	4,792.00	1,276,879.84	1,252,625.10	1,309,557.12

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
22,681,927.04	22,997,264.00	0.996

ตารางที่ ๑-18 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.60 เซนติเมตร

Time Step (day)	Pore Volume	ค่าจากแล็บ		ค่าจากโมเดล	
		mg/l (x)	C/Co LAB	mg/l (y)	C/C _o โมเดล
0.0000	0	0.0	0.000	0.00	0.000
0.0028	0.2	28.5	0.071	30.04	0.075
0.0056	0.4	62.2	0.156	71.72	0.179
0.0084	0.6	135.7	0.339	126.68	0.317
0.0112	0.8	228.7	0.572	187.44	0.469
0.0140	1.0	278.3	0.696	249.16	0.623
0.0168	1.2	295.9	0.740	303.72	0.759
0.0196	1.4	307.0	0.768	350.16	0.875
0.0224	1.6	321.0	0.803	376.92	0.942
0.0253	1.8	370.4	0.926	400.00	1.000
0.0281	2.0	361.3	0.903	375.04	0.938
0.0309	2.2	354.7	0.887	339.92	0.850
0.0337	2.4	325.5	0.814	303.48	0.759
0.0365	2.6	302.4	0.756	269.12	0.673
0.0393	2.8	256.5	0.641	220.68	0.552
0.0421	3.0	224.2	0.561	206.60	0.517
0.0449	3.2	197.5	0.494	182.96	0.457
0.0477	3.4	153.3	0.383	151.88	0.380
0.0505	3.6	118.6	0.297	125.68	0.314
0.0533	3.8	107.9	0.270	100.00	0.250
0.0561	4.0	82.8	0.207	81.00	0.203
0.0589	4.2	71.8	0.180	64.32	0.161
0.0617	4.4	59.3	0.148	51.44	0.129
0.0645	4.6	41.2	0.103	44.52	0.111
0.0673	4.8	36.4	0.091	39.20	0.098
0.0701	5.0	34.1	0.085	31.92	0.080

ตารางที่ ๑-18 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสั่นใจของตัวอย่างดิน S8 ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.60 เซนติเมตร (ต่อ)

x	y	xy	x ²	y ²
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
28.5	30.04	856.14	812.25	902.40
62.2	71.72	4,460.98	3,868.84	5,143.76
135.7	126.68	17,190.48	18,414.49	16,047.82
228.7	187.44	42,867.53	52,303.69	35,133.75
278.3	249.16	69,341.23	77,450.89	62,080.71
295.9	303.72	89,870.75	87,556.81	92,245.84
307.0	350.16	107,499.12	94,249.00	122,612.03
321.0	376.92	120,991.32	103,041.00	142,068.69
370.4	400.00	148,160.00	137,196.16	160,000.00
361.3	375.04	135,501.95	130,537.69	140,655.00
354.7	339.92	120,569.62	125,812.09	115,545.61
325.5	303.48	98,782.74	105,950.25	92,100.11
302.4	269.12	81,381.89	91,445.76	72,425.57
256.5	220.68	56,604.42	65,792.25	48,699.66
224.2	206.60	46,319.72	50,265.64	42,683.56
197.5	182.96	36,134.60	39,006.25	33,474.36
153.3	151.88	23,283.20	23,500.89	23,067.53
118.6	125.68	14,905.65	14,065.96	15,795.46
107.9	100.00	10,790.00	11,642.41	10,000.00
82.8	81.00	6,706.80	6,855.84	6,561.00
71.8	64.32	4,618.18	5,155.24	4,137.06
59.3	51.44	3,050.39	3,516.49	2,646.07
41.2	44.52	1,834.22	1,697.44	1,982.03
36.4	39.20	1,426.88	1,324.96	1,536.64
34.1	31.92	1,088.47	1,162.81	1,018.89

n	Σx	Σy	$\Sigma(xy)$	$\Sigma(x)^2$	$\Sigma(y)^2$
25	4,755.20	4,683.60	1,244,236.28	1,252,625.10	1,248,563.56

$(\Sigma x)^2$	$(\Sigma y)^2$	r
22,711,927.04	21,996,108.96	0.992

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายรัชพล พิพิธสมบัติ

เกิด 17 พฤศจิกายน พ.ศ.2527

สถานที่เกิด จ.เชียงใหม่

การศึกษา

พ.ศ.2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท (วศ.บ.)

สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

พ.ศ.2554 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (วศ.ม.)

สาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานทางวิชาการ

Aksara Putthividhya, Ratchapol Pipitsombat. Assessment of groundwater contamination with NO_3^- in heavily fertilized and intensively cultivated floodplain of Thailand using GIS and column transport experiments, International Symposium on Southeast Asia Water Environment Vol.8 2010: 95 – 102

Aksara Putthividhya, Ratchapol Pipitsombat. Laboratory-Scaled Nitrate Leaching Behaviors in Natural Homogeneous Nonuniform Soil and Groundwater, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16 2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย