

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(11)
รายการรูป	(12)
บทที่	
1 บทนำและการตรวจเอกสาร	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 สภาพทั่วไปของอำเภอรัตนพิบูลย์	3
1.2.1 ที่ตั้ง	3
1.2.2 ลักษณะภูมิประเทศ	3
1.2.3 ลักษณะธรณีวิทยาทั่วไป	4
1.2.4 สภาพธรณีวิทยาแหล่งแร่	6
1.2.5 สภาพอุทกวิทยา	6
1.2.6 สภาพอุทกธรณีวิทยา	7
1.3 สารหนู	9
1.3.1 เคมีของสารหนู	9
1.3.2 กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันของสารหนู	10
1.3.3 ปัจจัยในการดูดซับสารหนู	11
1.3.4 ธรณีเคมีของสารหนู ในน้ำใต้ดิน	12
1.4 การไหลของน้ำใต้ดิน	13
1.4.1 กฎของดาร์ซี	13
1.4.2 กฎการอนุรักษ์มวลสาร	14
1.4.3 ระบบการไหลของน้ำใต้ดิน	15
1.5 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน	17
1.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	18
1.6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำใต้ดิน	18
1.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่มวลสาร	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
1.6.3	สมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำใต้ดิน	20
1.6.4	สมการการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำใต้ดิน	22
1.7	แบบจำลอง ตระกูล MODFLOW	27
1.7.1	ลักษณะการคำนวณของ โปรแกรมย่อย MODFLOW	29
1.7.2	ลักษณะการคำนวณของ โปรแกรม MT3D	33
1.8	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำใต้ดิน	36
1.8.1	กำหนดวัตถุประสงค์ของการจำลอง	36
1.8.2	สร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์	36
1.8.3	การเลือกคอมพิวเตอร์โปรแกรม	36
1.8.4	การออกแบบแบบจำลอง	37
1.8.5	การปรับเทียบค่าพารามิเตอร์และการวิเคราะห์ความอ่อนไหว	38
1.8.6	การตรวจสอบความถูกต้องและปรับปรุงแบบจำลอง	39
1.8.7	การทำนายผลและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว	39
1.8.8	การแสดงผลการจำลอง	39
1.8.9	การติดตามผลการทำนาย	40
1.9	การจัดการสิ่งแวดล้อมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	40
1.10	ขีดจำกัดของแบบจำลอง	41
1.11	วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	42
1.12	ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	42
2	วิธีการวิจัย	43
2.1	ขอบเขตของการวิจัย	43
2.1.1	ขอบเขตด้านพื้นที่	43
2.1.2	ขอบเขตด้านเวลา	45
2.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	45
2.2.1	อุปกรณ์สำหรับทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	45
2.2.2	อุปกรณ์สำหรับภาคสนาม	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3	วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย 45
2.3.1	จัดเตรียมข้อมูลทางอุทกศาสตร์สำหรับใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 46
2.3.2	จัดเตรียมข้อมูลภาคสนามและข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ 47
2.3.3	สร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ 50
2.3.4	จัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 51
3	ข้อมูลพื้นที่ศึกษาและผลการศึกษาปริมาณสารหนูในพื้นที่ 52
3.1	ข้อมูลพื้นที่ศึกษา 52
3.1.1	ปริมาณน้ำฝน 52
3.1.2	การคายระเหย 53
3.1.3	ความชื้นสัมพัทธ์ 53
3.1.4	ปริมาณน้ำท่า 54
3.1.5	ต้นทุนน้ำ 55
3.2	ผลการศึกษาข้อมูลภาคสนาม 57
3.2.1	ผลการตรวจวัดระดับน้ำใต้ดิน 57
3.2.2	ผลการสำรวจระดับความสูงต่ำของพื้นที่ศึกษา 61
3.3	ผลจากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ 61
3.3.1	ปริมาณสารหนูละลายทั้งหมดในน้ำ 61
3.3.2	ปริมาณสารอินทรีย์ ในดินและการวิเคราะห์หาอัตราส่วน ทราย ทรายแป้งและดินเหนียว 69
3.3.3	การทดสอบการดูดซับสารหนูของดิน 70
4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 71
4.1	สร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ 71
4.2	การกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง 72
4.3	การออกแบบกริด 73
4.3.1	พื้นที่ศึกษา แนวตะวันออก-ตะวันตก 76
4.3.2	พื้นที่ศึกษา แนวเหนือ-ใต้ 76
4.3.3	ความสูงของแบบจำลอง 76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
4.4	สภาพขอบเขตของแบบจำลอง	76
4.5	กรณีจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการแพร่กระจายของสารหนู	78
4.5.1	การจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่	78
4.5.2	การจำลองการไหลของน้ำใต้ดินที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา	86
4.5.3	การจำลองการแพร่กระจายของสารหนูในสภาวะคงที่	90
4.5.4	การจำลองการแพร่กระจายของสารหนูในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา	92
4.6	การทดสอบความไวของตัวแปรในแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง	93
4.7	การจำลองการแพร่กระจายของสารหนูในน้ำใต้ดิน กรณีที่มีการใช้น้ำ	93
5	ผลการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	94
5.1	ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน	94
5.1.1	ผลการจำลองแบบสภาวะคงที่	94
5.1.2	การจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา	98
5.1.3	วิจารณ์ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน	106
5.2	การจำลองการแพร่กระจายของสารหนู	107
5.2.1	ผลการจำลองในสภาวะคงที่	107
5.2.2	ผลการจำลองในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา	108
5.2.3	วิจารณ์ผลการจำลองการแพร่กระจายของสารหนู	113
5.3	ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง	113
5.3.1	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองกรณีการจำลองในสภาวะคงที่	113
5.3.2	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองกรณีการจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	114
5.3.3	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองกรณีการจำลองการแพร่กระจายของสารหนู	116
5.3.4	วิจารณ์ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง	117

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 ผลการจำลองในกรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้น	118
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	121
6.1 สรุป	121
6.1.1 ข้อมูลพื้นที่ศึกษา	121
6.1.2 ข้อมูลภาคสนามและข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ	121
6.1.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	122
6.2 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย	124
บรรณานุกรม	125
ภาคผนวก	131
ก การวิเคราะห์ปริมาณสารหนู	132
ข การตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ในดิน	134
ค การหาขนาดองค์ประกอบขนาดของดิน	137
ง การทดสอบการดูดซับของสารหนู	140
จ ตารางผลการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นที่ศึกษา	141
ฉ การคำนวณหาปริมาณการเติมน้ำ	144
ช สมการการไหลของน้ำใต้ดิน	147
ประวัติผู้เขียน	151

รายการตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2-1	ขอบเขตของพื้นที่ศึกษา	43
ตารางที่ 3-1	ปริมาณการระเหยเฉลี่ยช่วงปี พ.ศ. 2526 - พ.ศ. 2545 ของพื้นที่ศึกษา	55
ตารางที่ 3-2	ผลการคำนวณการเติมน้ำ	56
ตารางที่ 3-3	ผลการตรวจวัดระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์ที่ได้คัดเลือกไว้	58
ตารางที่ 3-4	ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณสารหนูละลายทั้งหมดในน้ำตัวอย่าง	63
ตารางที่ 3-5	ปริมาณสารอินทรีย์ในดินและอัตราส่วน ทราย ทรายเป้งและดินเหนียว จากตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษา	69
ตารางที่ 4-1	ค่าขอบเขตระดับน้ำคงที่ในแต่ละกริดเซลล์	81
ตารางที่ 4-2	การเฉลี่ยค่าระดับแรงดันน้ำ สำหรับใช้เป็นค่าเริ่มต้น	85
ตารางที่ 4-3	การเพิ่มเติมน้ำรายเดือนในแบบจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา	87
ตารางที่ 4-4	ค่าระดับน้ำสำหรับขอบเขตระดับน้ำคงที่ในการจำลองแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา	88
ตารางที่ 4-5	ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำสำหรับใช้ในแบบจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา	89
ตารางที่ 4-6	ค่าคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของสารหนูในแบบจำลอง การแพร่กระจาย	92
ตารางที่ 5-1	สมดุลของน้ำใต้ดินจากการจำลองในสภาวะคงที่	97
ตารางที่ 5-2	สมดุลของน้ำใต้ดินจากการจำลองในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา	105
ตารางที่ 5-3	ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองในสภาวะคงที่ (แสดงค่า RMS, m)	114
ตารางที่ 5-4	ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง ในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (แสดงค่า RMS, m)	115
ตารางที่ 5-5	ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองการแพร่กระจายของสารหนู (แสดงค่า N-RMS, %)	116

รายการรูป

		หน้า
รูปที่ 1-1	ลักษณะภูมิประเทศของอำเภอรัตนพิบูลย์	4
รูปที่ 1-2	ลักษณะทางธรณีวิทยาทั่วไปของอำเภอรัตนพิบูลย์	5
รูปที่ 1-3	แผนภาพแสดงชั้นน้ำใต้ดิน ในพื้นที่ตำบลรัตนพิบูลย์	8
รูปที่ 1-4	Eh-pH ไคอะแกรมของสารหนู	10
รูปที่ 1-5	แผนภาพแสดงการทดลองของคาร์ซี	13
รูปที่ 1-6	แผนภาพแสดงระบบการไหลของน้ำใต้ดิน	16
รูปที่ 1-7	แผนภาพแสดงลักษณะการไหลและระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่รับน้ำ พื้นที่ ปันน้ำ และพื้นที่สูญเสีย	17
รูปที่ 1-8	แผนภาพแสดง Flow Chart ของ โปรแกรม Visual MODFLOW	28
รูปที่ 1-9	ลักษณะการแบ่งพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมในการจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน แบบ 3 มิติ	29
รูปที่ 1-10	แผนภาพแสดงการคำนวณแบบ block-centered ของ $cell_{i,j,k}$ และ cell ข้าง เคียง	30
รูปที่ 1-11	แผนภาพ Flow chart สำหรับการคำนวณในโปรแกรม MODFLOW ใน แต่ละ grid cell	31
รูปที่ 1-12	แผนภาพ Flow chart สำหรับการคำนวณในโปรแกรม MT3D ในแต่ละ grid cell	35
รูปที่ 2-1	ขอบเขตพื้นที่ศึกษา ในแบบระนาบ และ 3 มิติ	44
รูปที่ 2-2	ลักษณะของบ่อน้ำที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง	47
รูปที่ 2-3	การสำรวจระดับพื้นที่ศึกษา	48
รูปที่ 2-4	อุปกรณ์ Hand Auger	49
รูปที่ 2-5	การเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษา	49
รูปที่ 3-1	กราฟปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนอำเภอรัตนพิบูลย์	52
รูปที่ 3-2	กราฟปริมาณการระเหยเฉลี่ย ณ สถานีตรวจวัดอำเภอเมืองนครศรีธรรมราช	53
รูปที่ 3-3	กราฟความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ณ สถานีอำเภอเมืองนครศรีธรรมราช	54
รูปที่ 3-4	กราฟปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยของสถานีคลองเสาธง	54

รายการรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3-5	แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 เดือน กันยายน พ.ศ. 2544 และจุดเก็บตัวอย่างที่เลือกไว้เพื่อใช้ในการตรวจติดตาม	59
รูปที่ 3-6	ระดับน้ำเมื่อทำการลากเส้นระดับ และทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน	60
รูปที่ 3-7	เส้นแสดงระดับพื้นที่ศึกษาในแบบ 2 มิติ (ม.รทก.)	62
รูปที่ 3-8	ระดับความสูงพื้นที่ศึกษาในแบบ 3 มิติ (ม.รทก.)	62
รูปที่ 3-9	กราฟแสดงความเข้มข้นของสารหนูในน้ำรายเดือน เฉพาะสถานีที่มีค่าน้อยกว่า 50 ไมโครกรัมต่อลิตร	64
รูปที่ 3-10	กราฟแสดงความเข้มข้นของสารหนูในน้ำรายเดือน เฉพาะสถานีที่มีค่ามากกว่า 50 ไมโครกรัมต่อลิตร	64
รูปที่ 3-11	เส้นระดับความเข้มข้นของสารหนูในแต่ละเดือน	65
รูปที่ 3-12	แผนที่แสดงตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างดิน	69
รูปที่ 3-13	ผลการทดสอบการดูดซับของสถานี R9	70
รูปที่ 3-14	ผลการทดสอบการดูดซับของสถานี R14	70
รูปที่ 4-1	ขั้นตอนการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การแพร่กระจายของสารหนูในน้ำใต้ดิน ในพื้นที่ศึกษา	72
รูปที่ 4-2	แผนภาพแสดงแบบจำลองเชิงมโนทัศน์	73
รูปที่ 4-3	แผนที่แสดงพื้นที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การแพร่กระจายสารหนูในน้ำใต้ดิน	74
รูปที่ 4-4	แผนภาพแสดงการออกแบบกริดของแบบจำลอง	75
รูปที่ 4-5	แผนภาพแสดงขอบเขตของแบบจำลอง	77
รูปที่ 4-6	แผนภาพแสดงพื้นที่เติมน้ำปริมาณการเติมน้ำในการจำลองทางคณิตศาสตร์	79
รูปที่ 4-7	แผนภาพแสดงขอบเขตระดับน้ำคงที่ในแต่ละด้าน	80
รูปที่ 4-8	แผนภาพ 3 มิติ แสดงการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านได้	83
รูปที่ 4-9	แผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านได้	84

รายการรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4-10	ลักษณะการกระจายตัวเริ่มต้นของปริมาณสารหนู(ไมโครกรัมต่อลิตร)	91
รูปที่ 5-1	ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่	95
รูปที่ 5-2	แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินจากการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	96
รูปที่ 5-3	กราฟแสดงสมมูลของน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่	97
รูปที่ 5-4	ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ระยะเวลา 1 เดือน (พฤษภาคม พ.ศ. 2545)	99
รูปที่ 5-5	ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ระยะเวลา 8 เดือน (ธันวาคม พ.ศ. 2545)	100
รูปที่ 5-6	ผลการจำลองเทียบกับค่าที่วัดได้จริงในสนามในแต่ละบ่อ	101
รูปที่ 5-7	กราฟสมมูลน้ำจากการจำลองในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (1 ปี)	105
รูปที่ 5-8	ผลการจำลองการแพร่กระจายของสารหนูในสภาวะคงที่	108
รูปที่ 5-9	ผลการจำลองการแพร่กระจายของสารหนูในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ระยะเวลา 1 เดือน (พฤษภาคม พ.ศ. 2545)	109
รูปที่ 5-10	ผลการจำลองการแพร่กระจายของสารหนูในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ระยะเวลา 8 เดือน (เดือนธันวาคม พ.ศ. 2545)	110
รูปที่ 5-11	แผนภาพแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของสารหนูจากสถานี R16	111
รูปที่ 5-12	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารหนูในน้ำใต้ดิน เมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไป	112
รูปที่ 5-13	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองกรณีการจำลองในสภาวะคงที่	114
รูปที่ 5-14	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	115
รูปที่ 5-15	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองกรณีการจำลองการแพร่กระจายของสารหนู	116
รูปที่ 5-16	การแพร่กระจายของสารหนูในกรณีที่มีการใช้น้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น	120