

แบบจำลองการปนเปื้อนของไนเตรทในน้ำบาดาลบริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมา  
จากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอลำลูกกา จังหวัดเพชรบุรี

นางสาวปิ่นชญา กรุดสาท

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2559

NITRATE CONTAMINATION MODEL OF GROUNDWATER IN HUAY SAI ROYAL  
DEVELOPMENT STUDY CENTER AND ADJACENT AREAS, AMPHOE CHA-AM,  
CHANGWAT PHETCHABURI

MISS PANCHAYA KRUTSAT

A Project submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of the Bachelor of Science in Geology  
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University  
Academic Year 2016

หัวข้อโครงการ	แบบจำลองการปนเปื้อนของไนเตรทในน้ำบาดาลบริเวณศูนย์ ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณ ใกล้เคียง อำเภอลำลูกกา จังหวัดเพชรบุรี
โดย	นางสาวปัทมา กรุดสาท
สาขาวิชา	ธรณีวิทยา
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธ์รัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม	นายเกียรติพงษ์ คำดี

---

วันที่ส่ง.....

วันที่อนุมัติ.....

.....  
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธ์รัตน์)

.....  
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม  
(นายเกียรติพงษ์ คำดี)

ปัญญา กรุดสาท :

แบบจำลองการปนเปื้อนของไนเตรทในน้ำบาดาลบริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และบริเวณใกล้เคียง อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. (NITRATE CONTAMINATION MODEL OF GROUNDWATER IN HUAY SAI ROYAL DEVELOPMENT STUDY CENTER AND ADJACENT AREAS, AMPHOE CHA-AM, CHANGWAT PHETCHABURI) อ.ที่ปรึกษาโครงการหลัก : รศ.ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์, อ.ที่ปรึกษาโครงการร่วม : นายเกียรติพงษ์ คำดี, 69 หน้า.

ปัจจุบันสารเคมีจำนวนมากเข้ามามีบทบาทต่อการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ในด้านต่างๆ เช่น ด้านเกษตรกรรมและด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น หากใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะนำไปสู่การปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงน้ำบาดาล ซึ่งพื้นที่ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายเป็นพื้นที่ขาดแคลนน้ำผิวดิน ทำให้น้ำบาดาลเป็นทางเลือกหลักในการใช้อุปโภค โดยคุณภาพน้ำบาดาลอาจมีการปนเปื้อนของสารเคมีโดยเฉพาะการปนเปื้อนของไนเตรท จุดประสงค์ของงานครั้งนี้คือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Visual MODFLOW เพื่อศึกษาทิศทางการไหลของน้ำบาดาลและลักษณะการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2554 ถึง เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 เพื่อใช้ในแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะคงที่และสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่า ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5.88 – 9.49 เมตร โดยชั้นน้ำที่มีศักยภาพที่สุด คือ ชั้นน้ำประเภทยกอนที่ราบน้ำท่วมถึงเนื่องจากมีค่าสภาพการนำชลศาสตร์สูง คือ 23.76 m/d ส่วนแบบจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทโดยวัดค่าปริมาณไนเตรทในน้ำตั้งแต่เดือนตุลาคม 2557 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ 2558 พบว่า ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.42 – 3.58 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแบบจำลองแสดงทิศทางการไหลของน้ำบาดาลจากพื้นที่เติมน้ำบริเวณภูเขาไหลลงสู่กลางแอ่งซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่รับน้ำโดยพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของไนเตรทเนื่องจากเป็นพื้นที่เกษตรกรรมหนาแน่นและมีลักษณะเป็นแอ่งน้ำบาดาล เมื่อพิจารณาจากการปรับและวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์พบว่าตัวแปรที่มีความอ่อนไหวต่อการปรับแก้มากที่สุดได้แก่ค่าสภาพการนำชลศาสตร์

ภาควิชา.....ธรณีวิทยา.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....ธรณีวิทยา.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาโครงการหลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2559.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาโครงการร่วม.....

# # 5632726223 : MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS : NITRATE CONTAMINATION / MATHEMATICAL MODEL

PANCHAYA KRUTSAT: NITRATE CONTAMINATION MODEL OF GROUNDWATER IN HUAY SAI ROYAL DEVELOPMENT STUDY CENTER AND ADJACENT AREAS, AMPHOE CHA-AM, CHANGWAT PHETCHABURI. ADVISOR: ASSOC. PROF. SRILERT CHOTPANTARAT, Ph.D., CO-ADVISOR: MR. KIATTIPONG KAMDEE, 69 pp.

Nowadays a lot of chemicals are widely used in human activities, such as community, agriculture and industry. When using in excessive amounts, they can lead to soil and groundwater contamination. The study area is Huay Sai Royal Development Study Center where lacks of surface water, groundwater thus is the major source for the local community. However, the quality of groundwater may be not appropriate for consumption due to nitrate contamination. The objective of this study was to simulate groundwater flow and nitrate contamination in this area by using the mathematical models, so-called Visual MODFLOW. The groundwater flow modeling was calibrated and then verified with measured groundwater levels (from August 2011 to October 2014) in both the steady and transient states with RMS ranging from 5.88 – 9.49 m. According to the calibration and verification result, the main groundwater aquifers, flood-plain deposit aquifer, Qfd, has the highest hydraulic conductivity (K) of 23.76 m/day. The nitrate contamination was also well fitted with observed nitrate concentrations (from October 2014 to February 2015) with RMS ranging from 0.42 – 3.58 mg/L. The model revealed that groundwater flows from the recharge zone in high land to discharge zone located in the center of groundwater basin where was found high amount of nitrate contaminated in the groundwater due to slow groundwater flow and intensively agricultural areas. Finally, based on the sensitivity analysis, K is the most sensitive parameters affecting groundwater level and nitrate concentration.

Department: ..... Geology ..... Student's Signature.....

Field of Study: ..... Geology ..... Advisor's Signature.....

Academic Year: ..... 2016 ..... Co-advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ความรู้ และแนวคิดตลอดจนให้การดูแลในทุกเรื่องตลอดระยะเวลาดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ นายเกียรติพงษ์ คำดี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยทางด้านไนเตรท

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ และพี่บุคลากร ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำ และแนวคิดต่างๆเกี่ยวกับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ นายเทวนพฤทธิ์ ภาคไชย และนายวิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์ ที่ได้ให้ข้อมูล รวมถึงคำแนะนำ แนวคิด และกำลังใจในการจัดทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่น้อง ธรณีวิทยา รุ่น 57 และพี่ๆ น้องๆ ชมรมธรณีสัมพันธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยอบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจตลอดการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 พื้นที่ศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ลักษณะทางธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	19
3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา	21
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล	21
3.4 การกำหนดวัตถุประสงค์	23
3.5 การสร้างแบบจำลองเชิงโมทัศน์	23
3.6 การออกแบบกริด	24
3.7 การกำหนดขอบเขตเริ่มต้นและขอบเขตเงื่อนไข	25

3.8 การทดสอบความไหวของตัวแปรในแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์ ความอ่อนไหวของแบบจำลอง	42
บทที่ 4 ผลการศึกษา	
4.1 การจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะคงที่	43
4.2 การจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา	46
4.3 การจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล	52
4.4 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง	57
บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผลการศึกษา	
5.1 อภิปรายผลการศึกษา	59
5.2 สรุปผลการศึกษา	61
5.3 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	64



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สภาพการนำคลศาสตร์ของชั้นน้ำตะกอนร่วนและหินแข็งประเภทต่างๆ (Domineco and Schwartz, 1990)	10
ตารางที่ 2.2 ค่าการกักเก็บจำเพาะในวัสดุทางธรณีวิทยาประเภทต่างๆ (Domenico and Miffilin, 1965)	12
ตารางที่ 2.3 ค่าประสิทธิภาพการจ่ายน้ำและในวัสดุทางธรณีวิทยาประเภทต่างๆ (Morris and Johnson, 1967)	12
ตารางที่ 2.4 ค่าความพรุน ประสิทธิภาพการจ่ายน้ำและประสิทธิภาพ ในการดูดค้ำในวัสดุทางธรณีวิทยาประเภทต่างๆ (Heath,1983)	13
ตารางที่ 2.5 รายละเอียดของชุดการคำนวณที่สำคัญ ของแบบจำลอง MODFLOW	16
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง	26
ตารางที่ 3.2 ข้อมูล pumping wells	27
ตารางที่ 3.3 ข้อมูล observation wells วันที่ 8-11 สิงหาคม 2554 (วิวิวรรณ โรจน์บวรวิทยา, 2554)	30
ตารางที่ 3.4 ข้อมูล observed wells วันที่ 16-20 ตุลาคม 2557 (วิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์, 2557)	32
ตารางที่ 3.5 ข้อมูล concentration ของ observation wells ของวันที่ 16-20 ตุลาคม 2557 (เทวนพฤทธิ ภาคไชย, 2558)	34
ตารางที่ 3.6 ข้อมูล concentration ของ observation wells ของวันที่ 17-21 กุมภาพันธ์ 2557 (เทวนพฤทธิ ภาคไชย, 2558)	35
ตารางที่ 3.7 ข้อมูลรายละเอียดของอ่างเก็บน้ำ	38
ตารางที่ 4.1 สมดุลน้ำบาดาลจากการจำลองในสภาวะระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลง ตามเวลาของชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขา	49
ตารางที่ 4.2 สมดุลน้ำบาดาลจากการจำลองในสภาวะระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลง ตามเวลาของชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส	50
ตารางที่ 4.3 สมดุลน้ำบาดาลจากการจำลองในสภาวะระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลง ตามเวลาของชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส	51

## สารบัญรูปลูกภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 พื้นที่ศึกษาบริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี	2
รูปที่ 2.1 แผนที่ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียง	5
รูปที่ 2.2 แผนที่อุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียง	7
รูปที่ 2.3 วัฏจักรไนโตรเจน (ที่มา: Pearson Education, Inc. 2011)	8
รูปที่ 2.4 วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Anderson and Woessner, 2002)	15
รูปที่ 2.5 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Anderson and Woessner, 2002)	15
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	20
รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการออกแบบแบบจำลอง	22
รูปที่ 3.3 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (ดัดแปลงจากวิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์, 2557)	23
รูปที่ 3.4 การออกแบบกริดในแนวระนาบของแบบจำลอง	24
รูปที่ 3.5 การแบ่งชั้นของแบบจำลอง	25
รูปที่ 3.6 ลักษณะการแบ่งกริด ในแบบ สามมิติ	25
รูปที่ 3.7 แผนที่แสดงตำแหน่ง pumping wells	29
รูปที่ 3.8 แผนที่แสดงตำแหน่ง observation wells (วิวิวรรณ โรจน์บรรวิทยา, 2554)	32
รูปที่ 3.9 แผนที่แสดงตำแหน่ง observation wells (วิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์, 2557)	33
รูปที่ 3.10 แผนที่แสดงตำแหน่ง concentration ของ observation wells	36
รูปที่ 3.11 ภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ และความพรุนของแบบจำลองในรูปแบบสามมิติ	37
รูปที่ 3.12 ภาพแสดงค่าสภาพการนำชลศาสตร์ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ และความพรุนของแบบจำลองในรูปแบบสามมิติ	38
รูปที่ 3.13 ภาพแสดงผลการจำลองพื้นที่ศักยภาพน้ำบาดาล (ศุภลักษณ์ มุ่งดี, 2555)	39
รูปที่ 3.14 พื้นที่การเติมน้ำในแบบจำลอง	40
รูปที่ 3.15 แผนที่แสดงการปนเปื้อนไนเตรทในดิน (เทวนพฤทธิ ภาคไชย, 2558)	41

รูปที่ 4.1 ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่ปี 2554	44
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่ปี 2557	45
รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของน้ำบาดาลจากการจำลอง ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสภาวะคงที่	46
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะระดับน้ำบาดาล เปลี่ยนแปลงตามเวลา (มกราคม พ.ศ. 2556)	47
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะระดับน้ำบาดาล เปลี่ยนแปลงตามเวลา (มกราคม พ.ศ. 2557)	48
รูปที่ 4.6 กราฟสมมูลน้ำจากการจำลองของชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและ ตะกอนเศษหินเชิงเขาที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา (3ปี) ในหน่วย ลบ.ม.ต่อวัน	49
รูปที่ 4.7 กราฟสมมูลน้ำจากการจำลองของชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน -คาร์บอนิฟอรัสที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา (3ปี) ในหน่วย ลบ.ม.ต่อวัน	50
รูปที่ 4.8 กราฟสมมูลน้ำจากการจำลองของชั้นน้ำแกรนิตที่ระดับน้ำบาดาล เปลี่ยนแปลงตามเวลา (3ปี) ในหน่วย ลบ.ม.ต่อวัน	51
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล (เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557)	53
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล (เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558)	54
รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำบาดาล จากการคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557)	55
รูปที่ 4.12 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำบาดาล จากการคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในรูปแบบ 3 มิติ (เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557)	55
รูปที่ 4.13 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำบาดาล จากการคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558)	56
รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำบาดาลจาก การคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในรูปแบบ 3 มิติ (เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558)	56
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองในกรณี ของการไหลของน้ำบาดาลในน้ำบาดาล	57
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองในกรณี การแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล	58

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสารเคมีจำนวนมากเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ ในหลายด้าน เช่น ด้านเกษตรกรรมหรือด้านอุตสาหกรรม โดยหากได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะนำไปสู่การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม รวมถึงการปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ปัญหาดังกล่าวสามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น กิจกรรมของมนุษย์หรือผลกระทบจากกระบวนการทางธรรมชาติ (Jiang et al., 2009) ซึ่งพื้นที่บริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดเพชรบุรี เป็นพื้นที่ที่มีผลผลิตจากการเกษตรและการเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดการขาดแคลนทรัพยากรน้ำบาดาลโดยเฉพาะน้ำผิวดิน ดังนั้นจึงมีการใช้น้ำบาดาลเพิ่มมากขึ้นทำให้ระดับน้ำบาดาลลดต่ำลง จากการใช้สารเคมีส่งผลให้คุณภาพน้ำบาดาลไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้อุปโภคและบริโภคโดยเฉพาะการปนเปื้อนของไนเตรท (เทวนพฤทธิ ภาควิชา, 2558) โดยงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ น้ำบาดาลในการคาดการณ์หาขอบเขตที่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของไนเตรท โดยใช้แบบจำลอง Visual MODFLOW version 2010.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ยอมรับแพร่หลายในการสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์และเป็นโปรแกรมที่ใช้กับพื้นที่ที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิดของมลพิษที่ชัดเจน (Non-point source) หรือไม่สามารถระบุแหล่งที่มาของการปนเปื้อนได้ รวมถึงการแสดงผลการไหลของน้ำบาดาลในรูปแบบ 3 มิติ (Anderson and Woessner, 2002) ในการจำลองสภาพการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล นำไปสู่การประเมินผลกระทบและวางแผนการฟื้นฟูคุณภาพน้ำบาดาลในอนาคต

#### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของไนเตรทบริเวณพื้นที่ศูนย์การศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดเพชรบุรี

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาลักษณะการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายตัวของไนเตรทในชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

### 1.4 พื้นที่ศึกษา

บริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ครอบคลุมพื้นที่ตำบลห้วยทรายเหนือ ตำบลไร่ใหม่พัฒนา และตำบลสามพระยา มีพื้นที่โดยประมาณ 220 ตารางกิโลเมตร อยู่ในแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ลำดับชุด L7018 ระวัง 4934 II ชื่อระวางแผนที่ อำเภห้วยหิน และระวัง 4934 III ชื่อระวางแผนที่ บ้านหนองพลับ



รูปที่ 1.1 พื้นที่ศึกษาบริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แผนที่แสดงการปนเปื้อนของไนเตรทในน้ำบาดาลบริเวณพื้นที่ศูนย์การศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะทางธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

##### ลักษณะทางธรณีวิทยา (กรมทรัพยากรธรณี, 2552)

ประกอบด้วยการกระจายตัวของตะกอน หินตะกอน และหินอัคนี (รูปที่ 2.1) โดยสามารถเรียงอายุจากเก่ามาอ่อน ดังนี้

##### ตะกอนและหินตะกอน

##### 1. หินทรายยุคทีโวเนียนถึงไซลูเรียน (SD)

ประกอบด้วยหินทรายเนื้อควอตซ์ หินทรายเนื้อดิน สีน้ำตาล เทา และน้ำตาลแกมแดง เนื้อละเอียดถึงหยาบ เม็ดกึ่งกลม การคัดขนาดดี บางแห่งถูกแปรสภาพเป็นหินควอตซ์ไซต์ หินฟิลไลต์ และหินชนวน นอกจากนี้พบซากดึกดำบรรพ์จำพวกเทอะคิวโลดในชั้นหิวเซิร์ต มีอายุประมาณ 360-438 ล้านปี กระจายตัวอยู่ทางตะวันออกเฉียงใต้ของบริเวณตำบลห้วยทรายเหนือ

##### 2. หินยุคคาร์บอนิเฟอรัส หมวดหินเขาเจ้า (CPkc)

จัดอยู่ในกลุ่มหินแก่งกระจาน ประกอบด้วยหินทรายอาร์โคส สีขาวถึงสีน้ำตาลแกมเหลือง เนื้อละเอียดมากถึงปานกลาง การคัดขนาดปานกลางถึงดี ไม่แสดงชั้น และเป็นแถบชั้นบาง หินโคลนสีเทา สีเทาปานกลาง เนื้อละเอียดมากถึงละเอียด การคัดขนาดดี ชั้นบางและเป็นแถบชั้นบาง เม็ดแร่มีลักษณะเหลี่ยม พบซากดึกดำบรรพ์จำพวก หอยตะเกียง พลัปลิงทะเล และไบรโอซัว กระจายตัวทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษา

##### 3. ตะกอนน้ำพายุควอเทอร์นารี (Qa)

ประกอบด้วยกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว พบบริเวณตอนใต้ของพื้นที่ศึกษา

##### 4. ตะกอนตะพักลำน้ำยุคควอเทอร์นารี (Qt)

ประกอบด้วยกรวด และทราย พบทั่วพื้นที่ศึกษา

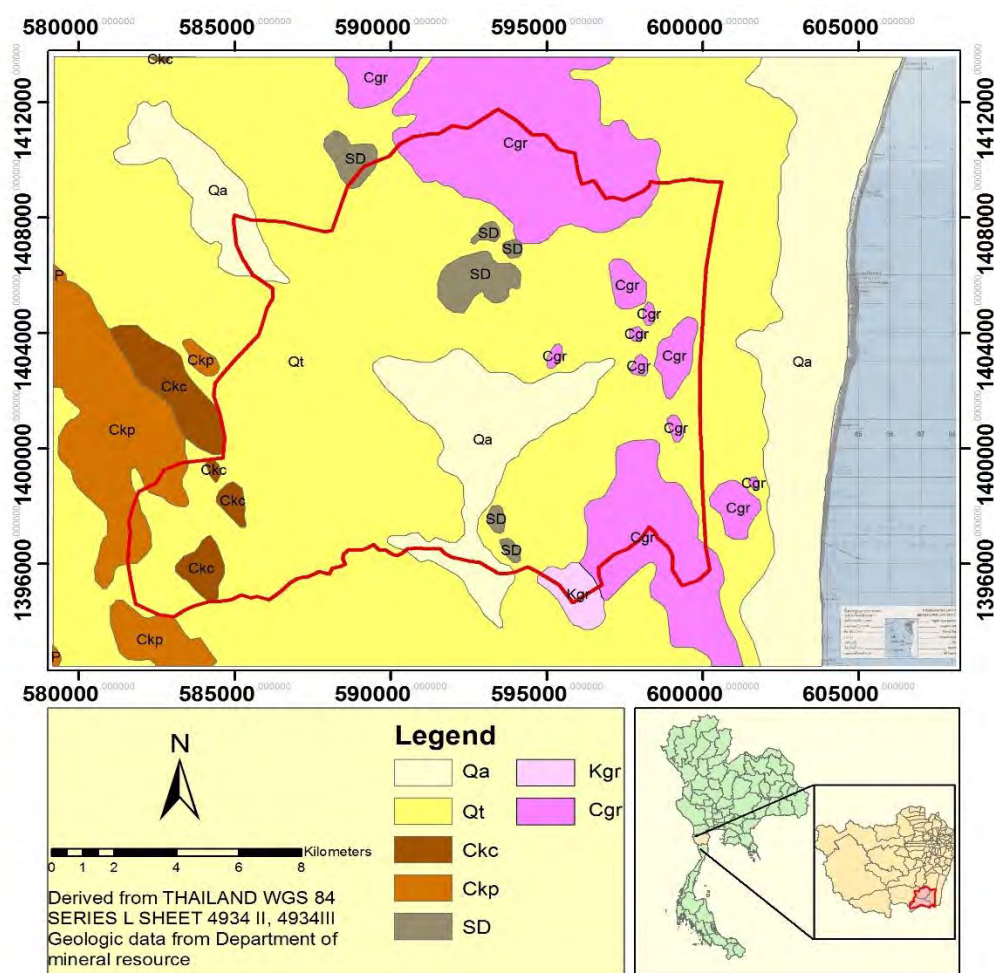
## หินอัคนี

### 1. หินแกรนิตยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Cgr)

เป็นหินแกรนิตเนื้อปานกลางถึงหยาบ พบการเรียงตัวของแร่กลุ่มเฟลสปาร์ผลึกใหญ่ค่อนข้างดี พบตั้งแต่บริเวณตอนกลางถึงทิศตะวันออกของพื้นที่ศึกษา

### 2. หินแกรนิตยุคครีเตเชียส (Kgr)

เป็นหินแกรนิตสีจาง เนื้อปานกลางถึงหยาบ ส่วนมากเนื้อสม่ำเสมอ และหินแอไพคลต์แกรนิต เนื้อละเอียดถึงปานกลาง พบเล็กน้อยบริเวณทิศตะวันตกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 2.1 แผนที่ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียง



### ลักษณะทางอุทกธรณี (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2552)

ประกอบด้วย การกระจายตัวของหินชนิดต่างๆ ที่สำคัญแบ่งออกเป็น 3 หน่วยหลัก (รูปที่

#### 2.2) ดังนี้

##### 1. ชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเชิงเขา (Floodplain Deposit aquifer, Qfd)

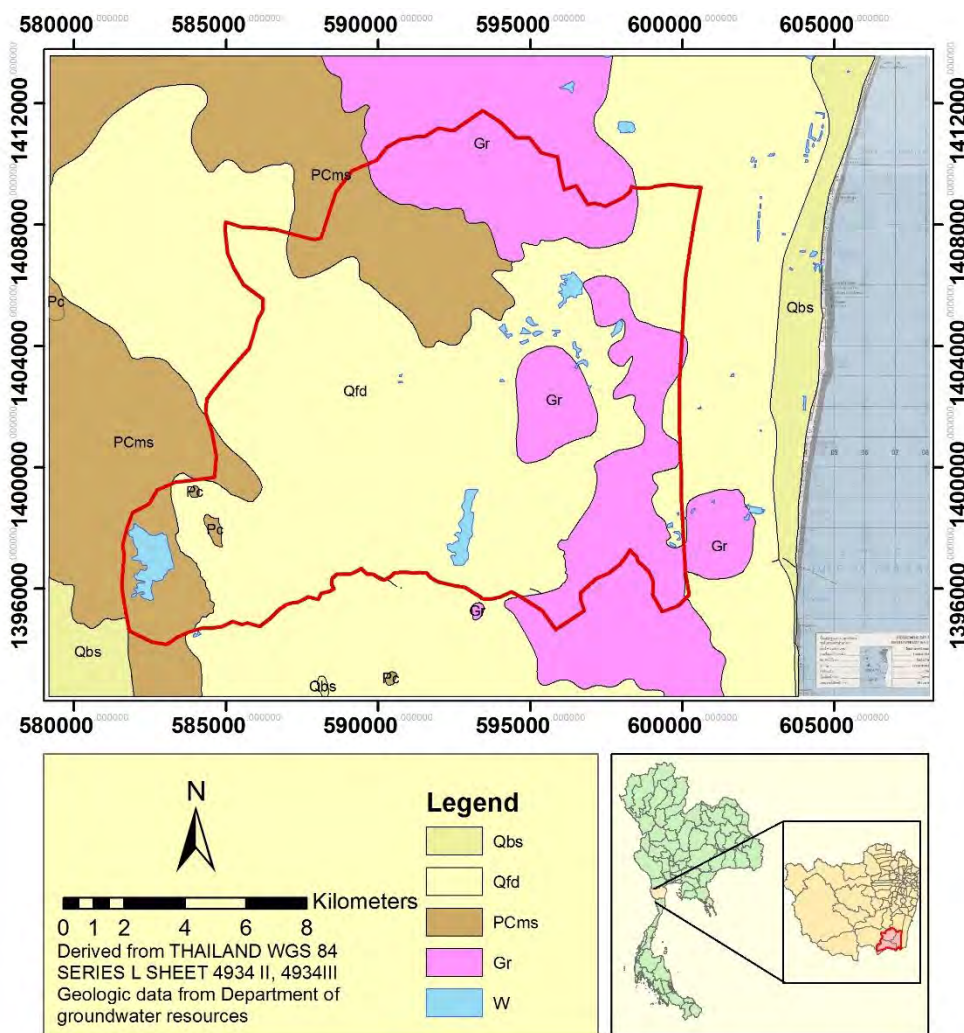
เป็นชั้นน้ำบาดาลชั้นบนสุด ประกอบด้วยตะกอนน้ำพาจำพวกกรวด ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว น้ำบาดาลจะถูกกักเก็บอยู่ในช่องว่างของเม็ดตะกอน ความลึกของชั้นน้ำบาดาลเฉลี่ย 2.5-4.5 เมตร ความหนาโดยประมาณ 30-40 เมตร คุณภาพน้ำบาดาลอยู่ในระดับปานกลาง ปริมาณการให้น้ำ 2-20 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

##### 2. ชั้นน้ำหินชั้นกึ่งหินแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิเฟอรัส (Permo-Carboniferous metasedimentary aquifer, PCMs)

เป็นชั้นน้ำบาดาลที่วางตัวอยู่ด้านล่างชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเชิงเขา ประกอบด้วยหินทรายควอตซ์ หินดินดานกึ่งหินฟิลไลต์และกึ่งหินชนวน พบน้ำบาดาลบริเวณรอยต่อ รอยเลื่อน และรอยแตกของชั้นหิน ความลึกของชั้นน้ำบาดาลเฉลี่ย 30-40 เมตร ความหนาโดยประมาณ 100 เมตร พบปริมาณเหล็กสูงเกินกว่ามาตรฐาน (1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาณการให้น้ำ 2-10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

##### 3. ชั้นน้ำหินแกรนิตอายุครีเตเชียส (Cretaceous granitic aquifer, Gr)

เป็นชั้นน้ำบาดาลที่แทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นน้ำทั้งสองชั้นแรก จะพบทางบริเวณตะวันออกของพื้นที่ เป็นส่วนใหญ่ ประกอบไปด้วยหินแกรนิต ที่มีแร่ไบโอไทต์ ฮอร์นเบลนด์ มัสโคไวต์ และทัวร์มาลีน เป็นส่วนประกอบ ผลึกเนื้อดอกขนาดเท่ากัน น้ำบาดาลจะอยู่ในรอยแตก รอยแยก และชั้นหินผุ ความลึกของชั้นน้ำบาดาลเฉลี่ย 2.5-4.5 เมตร ส่วนใหญ่จะมีปริมาณน้ำน้อย เพราะรอยแตกที่ไม่ต่อเนื่อง



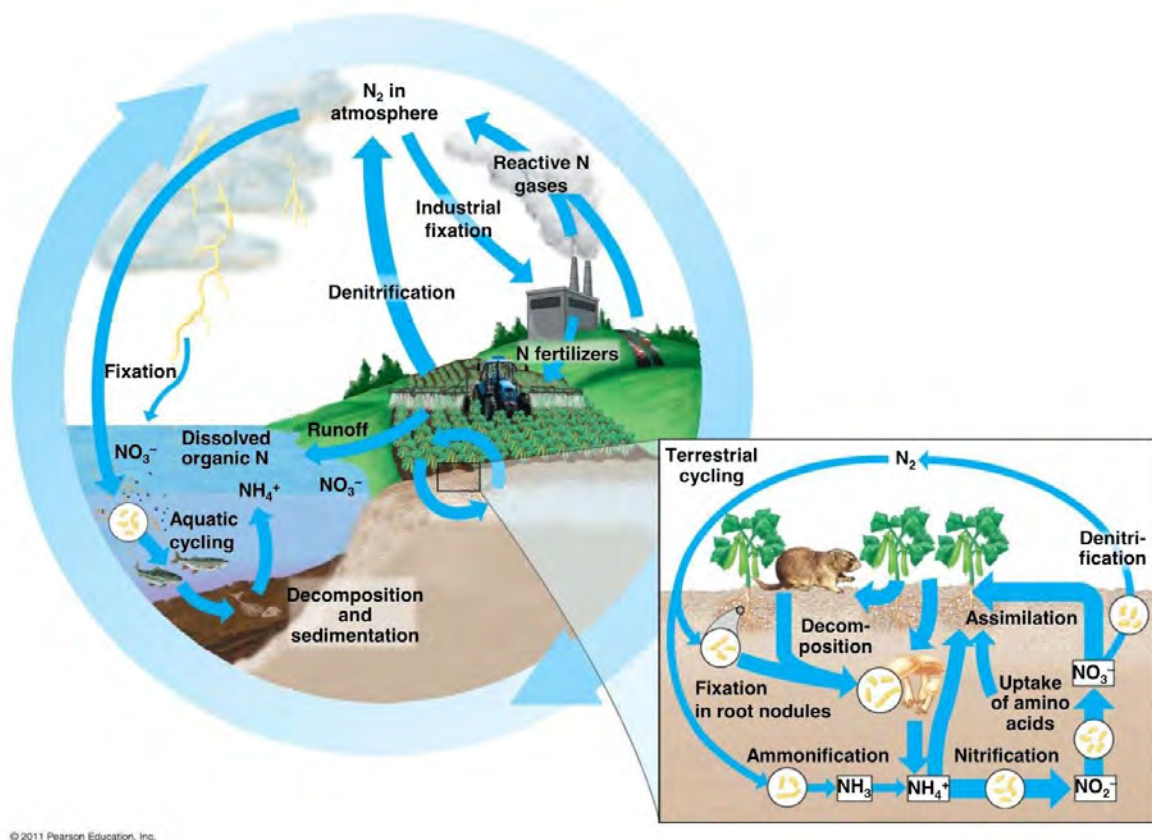
รูปที่ 2.2 แผนที่อุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียง

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### วัฏจักรไนโตรเจน

ไนโตรเจนมีการแลกเปลี่ยนระหว่างบรรยากาศและพื้นดินอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า วัฏจักรไนโตรเจน โดยธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตในการสร้างโปรตีนในการเจริญเติบโต ซึ่งในบรรยากาศมีก๊าซไนโตรเจน ประมาณร้อยละ 78 แต่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง ซึ่งจะใช้ได้เมื่อไนโตรเจนในบรรยากาศถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบ เช่น แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท โดยกระบวนการตรึงไนโตรเจน (Nitrogen Fixation) ที่ทำให้ไนโตรเจนอยู่ในรูปสารประกอบต่างๆ เริ่มจากสารประกอบแอมโมเนียม เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า กระบวนการสร้างแอมโมเนีย

(Ammonification) จากนั้นนำไปสู่กระบวนการสร้างไนเตรท (Nitrification) และกระบวนการสร้างไนโตรเจน (Denitrification) ตามลำดับ กระบวนการเหล่านี้จะต้องอาศัยแบคทีเรียและจุลินทรีย์จำนวนมาก จึงทำให้เกิดสมดุลของวัฏจักร นอกจากนี้สิ่งมีชีวิตแล้ว ไนโตรเจนในบรรยากาศ ยังสามารถถูกตรึงได้จากธรรมชาติหรือการกระทำของมนุษย์อีกด้วย (รูปที่ 2.3)



© 2011 Pearson Education, Inc.

รูปที่ 2.3 วัฏจักรไนโตรเจน (ที่มา: Pearson Education, Inc. 2011)

### การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำบาดาล

กระบวนการการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลที่สำคัญ มี 3 กระบวนการ (Spitz and Mareno, 1996) ดังนี้

#### 1. การพา (Advection)

เป็นกระบวนการพามวลสารไปพร้อมกับการเคลื่อนที่มวลน้ำอันเนื่องมาจากความแตกต่างของระดับน้ำ โดยผ่านตามรูพรุนของชั้นหินที่มวลน้ำมีการไหลผ่าน โดยชั้นหินให้น้ำที่มีค่าการซึมผ่านได้สูง เช่น ทราย หรือกรวด จะมีการเคลื่อนที่แบบนี้เป็นการเคลื่อนที่หลัก

## 2. การแพร่กระจาย (Dispersion)

เป็นกระบวนการที่มวลสารค่อยๆ แพร่กระจายไปในมวลน้ำที่แพร่ไปในทิศทางเดียวกัน และในแนวขวางของทิศทางการไหล ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วการไหลของน้ำและการแพร่ (diffusion) จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่ำ

## 3. การดูดติดผิว (Sorption)

มี 2 แบบ คือ การดูดซับ (absorption) และการคาย (desorption) โดยการดูดซับเป็นกระบวนการที่มวลสารถูกหน่วงให้เคลื่อนที่ช้าลง หรือลดความเข้มข้นลงด้วยการยึดติดของโมเลกุล หรือพันธะทางเคมี กับผิวอนุภาคของชั้นหินในน้ำ ส่วนการคายเป็นการเพิ่มขึ้นของมวลสารในน้ำเนื่องจากการสลายตัวจากสถานะที่เป็นของแข็ง โดยการดูดติดผิวทั้งสองแบบนี้เป็นผลมาจากกระบวนการธรณีเคมี (geochemical process) ต่างๆ เช่น pH อุณหภูมิ สารประกอบอื่นๆ และองค์ประกอบของชั้นหินอุ้มน้ำ

## สมการการไหลของน้ำบาดาล

จากกฎของดาร์ซี (Darcy's law) พบว่าอัตราการไหลของน้ำผ่านวัสดุที่มีรูพรุน จะแปรผันตรงกับความลาดชันไฮดรอลิก (Hydraulic Gradient) ปริมาณการไหลของน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ (Hydraulic Conductivity, K) ของวัสดุนั้น

$$V = -K \frac{\Delta h}{ne\Delta l} \quad (2.1)$$

เมื่อ	V	คือ ความเร็วเฉลี่ยเชิงเส้นของน้ำบาดาล (Average linear velocity, LT <sup>-1</sup> )
	K	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) (LT <sup>-1</sup> )
	$\Delta h$	คือ ความแตกต่างของระดับน้ำบาดาล Piezometric Head (L)
	$n_e$	คือ ประสิทธิภาพ (Effective porosity)
	$\Delta l$	คือ ระยะทางวัดตามทิศทางความเร็วเฉลี่ยการไหล (L)

### สภาพการนำชลศาสตร์ (Hydraulic conductivity, K)

สภาพการนำชลศาสตร์เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางรูพรุนหรือชั้นหินอุ้มน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกลางรูพรุน เช่น ขนาดของเม็ดดิน และจำนวนช่องว่างระหว่างเม็ดดินของตัวกลางรูพรุนนั้นๆ นอกจากนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนาแน่น และความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล

โดยอัตราการไหลของน้ำผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่มีทิศทางตั้งฉากกับการไหลภายใต้ความลาดชันทางชลศาสตร์ (hydraulic gradient) 1 หน่วย สภาพการนำชลศาสตร์ในหินชนิดเดียวกันอาจมีความแตกต่างกันในตำแหน่งและทิศทางโดยแบ่งได้ดังนี้

1. กรณีที่ค่า K ของชั้นน้ำไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งต่างๆ จะเรียกว่าเป็นชั้นหินอุ้มน้ำแบบ homogeneous แต่ถ้าค่า K เปลี่ยนไปตามตำแหน่ง จะเรียกว่าเป็นชั้นน้ำแบบ heterogeneous
2. กรณีที่ค่า K ของชั้นน้ำไม่เปลี่ยนไปตามทิศทางจะเรียกว่าเป็นชั้นหินอุ้มน้ำแบบ isotropic แต่ถ้าค่า K เปลี่ยนไปตามทิศทาง จะเรียกว่าเป็นชั้นน้ำแบบ anisotropic

สภาพการนำชลศาสตร์ของหินแต่ละประเภทจะมีค่าไม่เท่ากัน (ตารางที่ 2.1)

**ตารางที่ 2.1** สภาพการนำชลศาสตร์ของชั้นน้ำตะกอนร่วนและหินแข็งประเภทต่างๆ (Domineco and Schwartz, 1990)

Material	Hydraulic Conductivity (m/s)
<b>Unconsolidated Sedimentary Materials</b>	
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	$8 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-9}$

<b>Sedimentary rock</b>	
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	$1 \times 10^{-13} - 2 \times 10^{-9}$
<b>Crystalline Rocks</b>	
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 rock	$3 \times 10^{-14} - 2 \times 10^{-10}$

### ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage Coefficient, S)

ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ หมายถึง ปริมาตรของน้ำที่ชั้นน้ำสามารถให้ออกมาจากปริมาตรการกักเก็บของชั้นน้ำ 1 หน่วย ภายใต้ 1 หน่วยพื้นที่ของชั้นน้ำบาดาลและ 1 หน่วยของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ

การกักเก็บจำเพาะ (Specific storage, S<sub>s</sub>) หมายถึง ปริมาณของน้ำที่ถูกปล่อยออกมาหรือกักเก็บเข้าไปต่อปริมาตรของชั้นน้ำที่อิ่มตัวด้วยน้ำ สำหรับชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (ตารางที่ 2.2)

ประสิทธิภาพในการจ่ายน้ำ (Specific yield, S<sub>y</sub>) หมายถึง อัตราส่วนของปริมาตรของน้ำที่จ่ายออกมาหรือถูกดึงออกมาจากหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงโลกต่อปริมาตรของหินทั้งหมด สำหรับชั้นน้ำไร้แรงดัน (ตารางที่ 2.3 และ 2.4)

ประสิทธิภาพในการดูดค้าง (Specific retention, S<sub>r</sub>) หมายถึง อัตราส่วนของปริมาตรของน้ำที่ตกค้างหรือดูดค้าง จากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงต่อปริมาตรของหินทั้งหมด (ตารางที่ 2.4)

**ตารางที่ 2.2** ค่าการกักเก็บน้ำเฉพาะในวัสดุทางธรณีวิทยาประเภทต่างๆ (Domenico and Mifflin, 1965)

Material	Ss (m <sup>-1</sup> )
Plastic clay	$1.89 \times 10^{-3} - 2.38 \times 10^{-4}$
Stiff clay	$2.38 \times 10^{-4} - 1.19 \times 10^{-4}$
Medium hard clay	$1.19 \times 10^{-4} - 8.53 \times 10^{-5}$
Loose sand	$4.57 \times 10^{-5} - 9.45 \times 10^{-5}$
Dense sand	$1.19 \times 10^{-5} - 1.89 \times 10^{-5}$
Dense sandy gravel	$4.57 \times 10^{-6} - 9.45 \times 10^{-6}$
Rock, fissured	$3.05 \times 10^{-7} - 9.45 \times 10^{-6}$
Rock, sound	$< 3.05 \times 10^{-7}$

**ตารางที่ 2.3** ค่าประสิทธิภาพการจ่ายน้ำและในวัสดุทางธรณีวิทยาประเภทต่างๆ (Morris and Johnson, 1967)

Material	Specific yield (%)	Material	Specific yield (%)
Gravel, coarse	21	Limestone	14
Gravel, medium	24	Dune sand	38
Gravel, fine	28	Loess	18
Sand, coarse	30	Peat	44
Sand, medium	32	Schist	26
Sand, fine	33	Siltstone	12
Silt	20	Till, predominantly silt	6
Clay	6	Till, predominantly sand and gravel	16
Sandstone, fine grained	21	Tuff	21
Sandstone, medium grained	27		

**ตารางที่ 2.4** ค่าความพรุน ประสิทธิภาพการจ่ายน้ำและประสิทธิภาพในการดูดค้างในวัสดุทางธรณีวิทยาประเภทต่างๆ (Heath,1983)

Material	Porosity (%)	Specific	Specific
		Yield (%)	Retention (%)
Plastic clay	55	40	15
Stiff clay	50	2	48
Medium hard clay	25	22	3
Loose sand	20	19	1
Dense sand	20	18	2
Dense sandy gravel	11	6	5
Rock, fissured	0.1	0.09	0.01
Rock, sound	11	8	3

#### ค่าความพรุน (Porosity, n)

ความพรุน หมายถึงอัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของหินทั้งหมด (ตารางที่ 2.4)

#### สมการการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำบาดาล

สมการการเคลื่อนที่ของมวลสารขึ้นอยู่กับผลของการจำลองการไหลของน้ำเป็นหลัก โดยอาศัยการคำนวณลักษณะการแพร่กระจายของสารนั้น ดังนั้นอัตราความเข้มข้นของมวลสารที่เคลื่อนที่ในเวลาต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการอนุพันธ์เชิงซ้อน (Partial differential equation) (Zheng, 1996)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_i C) + \frac{q_s}{n} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (2.2)$$

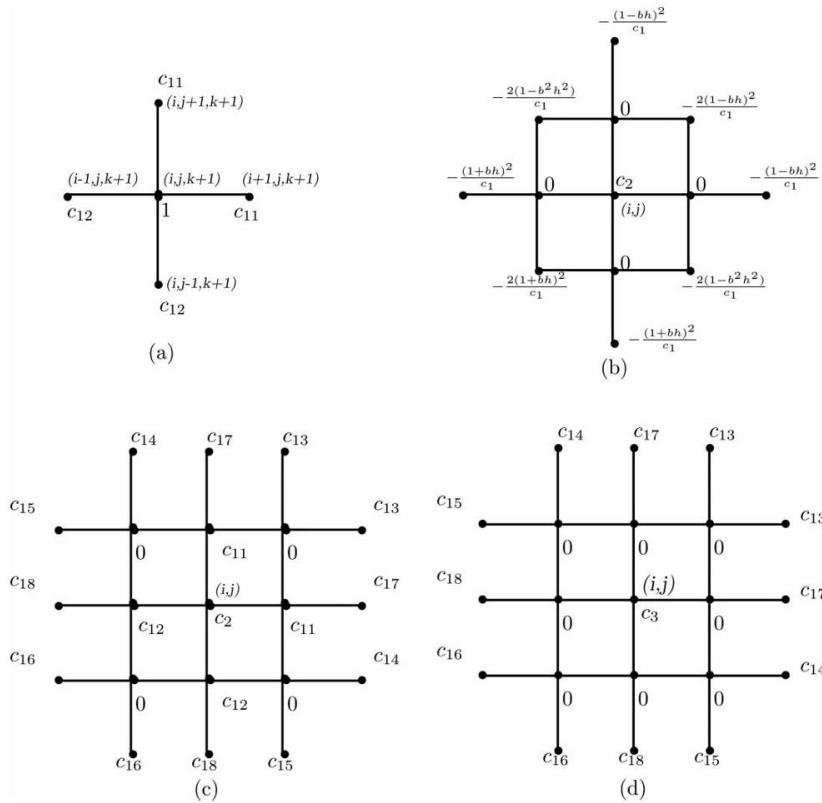
เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของมวลสารที่ละลายในน้ำ ( $ML^{-3}$ )  
t คือ เวลา (T)



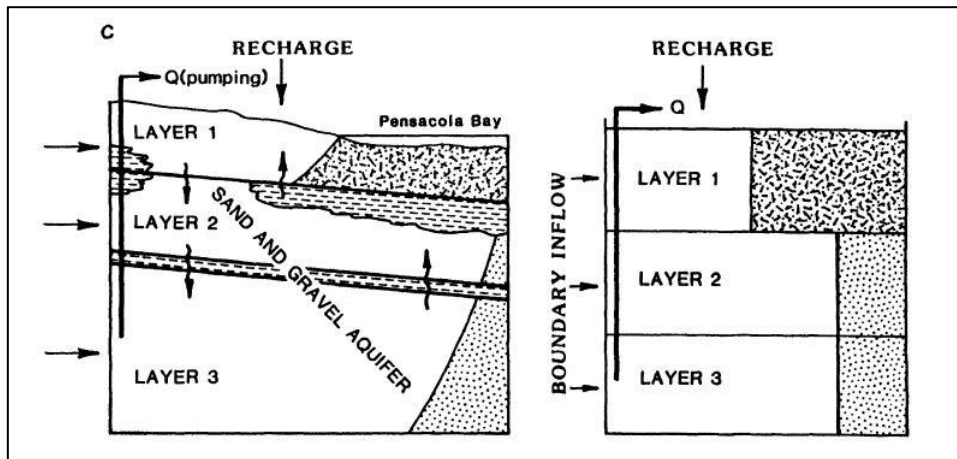
$X_i$	คือ ระยะทางที่มวลสารเคลื่อนที่ในแนวแกน X (L)
$D_{ij}$	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Hydrodynamic dispersion coefficient) ( $L^2T^{-1}$ )
$V_i$	คือ ความเร็วเฉลี่ยเชิงเส้นของน้ำบาดาล (Average linear velocity) ( $LT^{-1}$ )
$q_s$	คือ อัตราของน้ำที่ไหลเข้า (Source, +) หรือไหลออก (Sinks, -)
$n$	คือ ความพรุนของวัตถุตัวกลาง
$C_i$	คือ ความเข้มข้นของมวลสาร ณ จุดที่เข้าสู่แหล่งน้ำ ( $ML^{-3}$ )
$R_K$	คือ มวลสารที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในขณะที่มีการเคลื่อนที่ ( $L^{-3}T^{-1}$ )

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MODFLOW (MODular finite-difference groundwater FLOW model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองน้ำบาดาล เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่นำระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์มาคำนวณและวิเคราะห์ทิศทาง ขนาดและพฤติกรรมการไหลของน้ำใต้ดิน รวมถึงการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำใต้ดิน เพื่อประเมินสภาพที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติ ตลอดจนคาดการณ์เหตุการณ์ต่างๆ อีกทั้งยังนำการแก้ปัญหาแบบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite-difference method) คือการแบ่งพื้นที่ของชั้นน้ำออกเป็นตารางย่อยๆ จำนวนมาก โดยแบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยม (รูปที่ 2.4) เข้ามาประยุกต์ในการคำนวณกับทฤษฎีการไหลของน้ำใต้ดิน เนื่องจากการสูบน้ำ การเติมน้ำ การไหลจากแม่น้ำ ซึ่งตัวโปรแกรมหลักของ MODFLOW ประกอบด้วยโมดูลเล็กๆ หลายโมดูล ซึ่งแต่ละโมดูลถูกเรียกว่าชุดการคำนวณ (ตารางที่ 2.2) นอกจากนี้การสร้างแบบจำลองเชิงมนัทสน์มีความสำคัญต่อการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อให้แบบจำลองมีความเสมือนจริงและให้เข้าใจถึงลักษณะทางอุทกธรณีของพื้นที่ (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.4 วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Anderson and Woessner, 2002)



รูปที่ 2.5 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Anderson and Woessner, 2002)

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดของชุดการคำนวณที่สำคัญ ของแบบจำลอง MODFLOW

ชื่อ Package	ตัวย่อ	รายละเอียดของ Package
Basic	BAS	จัดการงานทั้งหมดของโมเดล เช่นกำหนดขอบเขต การกำหนดความยาวของ Time step การสร้างเงื่อนไขตั้งต้น และการพิมพ์ผลลัพธ์
Block-Centered Flow	BCF	คำนวณเทอมของสมการ Finite-Difference ซึ่งแทนที่การไหลผ่านตัวกลางรูพรุน โดยเฉพาะการไหลจากเซลล์ไปเซลล์ และการไหลเข้าไปใน Storage
Well	WEL	เทอมที่เพิ่มเข้าไปแทนการไหลจากบ่อบาดาล
Recharge	RCH	เทอมที่เพิ่มเข้าไปแทนการไหลจากแม่น้ำ
Drain	DRN	เทอมที่เพิ่มเข้าไปแทนการไหลจากการระบายน้ำ
General-Head Boundaries	GHB	เทอมที่เพิ่มเข้าไปแทนที่ general-head boundary

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MT3D (A Modular Three-Dimension Transport Model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MT3D เป็นโปรแกรมและการออกแบบระหว่าง MT3D และ MODFLOW ช่วยให้มีความสะดวกต่อการทำงานร่วมกัน เพื่อนำมาจำลองสภาพการแพร่เนื่องจากการไหลของน้ำ การแพร่กระจาย และปฏิกิริยาเคมีของสารละลายที่อยู่ในระบบน้ำใต้ดิน โดยการนำเอาสมการที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของปริมาณมวลสารและกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของมวลสารมาใช้ในการคำนวณ ดังนั้นการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ต้องทำความเข้าใจกับกระบวนการหรือกลไกต่างๆ ในการเคลื่อนที่ของมวลสารก่อน เพื่อพัฒนาแบบจำลองให้มีความเสมือนจริงและสามารถทำนายได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### งานวิจัยในประเทศไทย

ณัฐวุฒิ นาคงาม (2549) ศึกษาทิศทางการไหลและการแพร่กระจายของสารหนูในน้ำใต้ดินกรณีศึกษา อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำรวมถึงสารหนูจำนวน 25 บ่อ เป็นจำนวน 8 ครั้ง เพื่อทำการประเมินทิศทางการไหลและจำลองเชิง

คณิตศาสตร์การไหลของน้ำใต้ดินใน 3 มิติ พบว่าปริมาณสารหนูจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากการไหลของน้ำและการแพร่กระจายน้อยมาก

**เทวนพทธี ภาคไชย (2558)** ศึกษาปัจจัยและกระบวนการที่ส่งผลต่อปริมาณไนเตรทในน้ำบาดาลบริเวณศูนย์ศึกษาการห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอลำลูกกา จังหวัดเพชรบุรี โดยเก็บตัวอย่าง 2 ช่วงเวลา คือ ฤดูฝน และฤดูร้อน ที่ครอบคลุมพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน พบว่าในช่วงฤดูฝนมีค่าไนเตรทเกินจากค่ามาตรฐาน (<45 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2 บ่อ ซึ่งในฤดูร้อนไม่พบน้ำบาดาลที่เกินค่ามาตรฐาน แต่ค่าไนเตรทที่พบไนเตรทสูงสุดในฤดูฝนและฤดูร้อนมีความสัมพันธ์กันในพื้นที่รับน้ำเดียวกัน

**วิวิวรรณ โรจน์บวรวิทยา (2554)** ศึกษาลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของชั้นน้ำบาดาลบริเวณศูนย์ศึกษาการห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอลำลูกกา จังหวัดเพชรบุรี พบว่ามีชั้นน้ำ ที่มีความสามารถในการให้น้ำ บาดาลจำนวน 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขา (Qfd), ชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส (PCms) และชั้นน้ำหินแกรนิต ( Gr) โดยบริเวณภูเขาทางตะวันตกและตะวันออกของพื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่เติมน้ำ ส่วนพื้นที่ราบลุ่มตอนกลางเป็นพื้นที่สูญเสียน้ำ และมีทิศทางการไหลจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ไปยังทิศตะวันออกเฉียงเหนือ บางบริเวณมีการสูบน้ำเพื่อการเกษตรกรรมในปริมาณ จึงทำให้เกิดการลดระดับน้ำรูปกรวย นอกจากนี้ได้ทำการสร้างภาพตัดขวางของชั้นน้ำบาดาลเป็นจำนวน 4 แนว

**วิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์ (2557)** ศึกษาลักษณะการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายตัวของน้ำทะเลที่รุกเข้าเข้าไปบริเวณศูนย์ศึกษาการห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอลำลูกกา จังหวัดเพชรบุรี โดยทำการตรวจวัดระดับน้ำและเก็บตัวอย่างน้ำมาเพื่อตรวจวัดค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าน้ำบาดาลมีทิศทางการไหลจากพื้นที่เติมน้ำไหลลงสู่กลางแอ่งซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่เติมน้ำและไหลออกสู่ทะเลในทิศตะวันออก ส่วนการรุกคืบของน้ำทะเลพบว่าในเวลา 1 ปี มีการรุกคืบของน้ำทะเลเข้ามาในระดับหนึ่ง แต่เมื่อเวลา 20 ปี มีการรุกคืบของน้ำทะเลเข้ามาถึงตอนกลางของพื้นที่ศึกษา

**ศุภลักษณ์ มุ่งดี (2555)** ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาลบริเวณศูนย์ศึกษาการห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี โดยใช้วิธีถ่วงน้ำหนักของตัวแปรที่มีผลต่อศักยภาพในการเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาลประยุกต์กับเทคนิคระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อจัดทำแผนที่แสดงค่าพื้นที่ที่มีศักยภาพในการเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาล พบว่าพื้นที่ศักยภาพในการเติมน้ำแบ่งเป็น 4 ระดับคือ สูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำมาก โดยพื้นที่เติมน้ำสูงสุดอยู่ทางตะวันออกของพื้นที่ศึกษา และเมื่อตรวจสอบความถูกต้องจากปริมาณน้ำที่เติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลพบว่าปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานที่ศึกษาที่ผ่านมาที่พบว่าการเติมน้ำของกลุ่มน้ำในประเทศไทยอยู่ในช่วง 0-12 เปอร์เซ็นต์

#### งานวิจัยในต่างประเทศ

**Dario et al. (2007)** ศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของไนเตรทบริเวณเมือง Piedmont ของประเทศอิตาลี เพื่อนำมาพัฒนาแบบจำลองทางกายภาพ เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ทำฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งมีแนวโน้มที่ส่งผลกระทบต่อปนเปื้อนของไนเตรทในน้ำบาดาลจากการขับถ่ายออกมาจากสัตว์ จากการศึกษาพบว่าปริมาณไนเตรทปนเปื้อนในน้ำบาดาลมากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเกิดค่ามาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก

**Jiang and Somers (2008)** ศึกษาผลกระทบของการปนเปื้อนไนเตรทจากแหล่งกำเนิดที่ไม่สามารถระบุแน่ชัดในน้ำบาดาลบริเวณเกาะพริ้นซ์เอ็ดเวิร์ด รัฐของประเทศแคนาดา และแสดงผลกระทบออกมาในรูปแบบของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงลักษณะการแพร่กระจายของไนเตรทจากการศึกษาพบว่าพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของปริมาณไนเตรทมากที่สุดคือ บริเวณที่มีการปลูกมันฝรั่งทำให้พื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยราคาที่สองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.97 เมตร

**Eltarabily et al. (2016)** ศึกษาผลกระทบของการปนเปื้อนไนเตรทจากแหล่งกำเนิดที่ไม่สามารถระบุแน่ชัดในน้ำบาดาลบริเวณทางตอนใต้ของแม่น้ำไนล์ ประเทศอียิปต์ โดยประยุกต์ใช้โปรแกรม MODFLOW และ MT3D ในการแสดงผลการแพร่กระจายของไนเตรท โดยหลังจากการปรับให้ค่าที่ได้จากการคำนวณในแบบมีค่าใกล้เคียงกับบ่อสังเกตการณ์ พบว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดคือบริเวณที่มีความลึกตื้นเนื่องจากบริเวณใกล้เคียงมีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนมาก

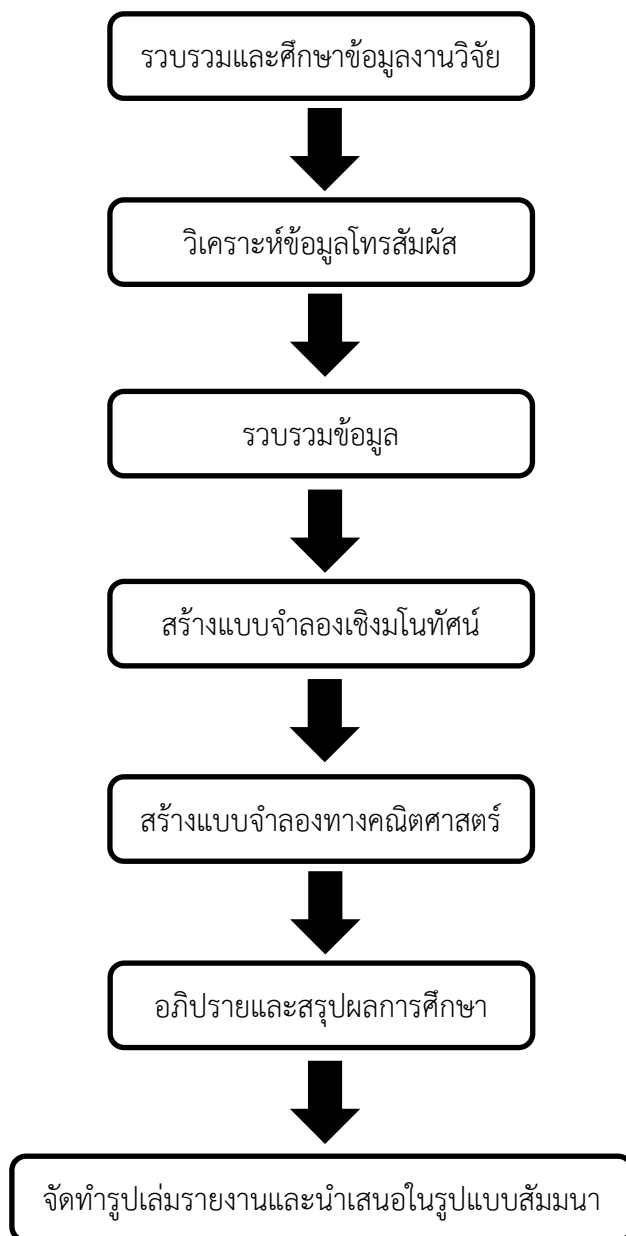
## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. รวบรวมและศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เคยมีผู้ทำการศึกษามาแล้ว
  - ศึกษาข้อมูลลักษณะทางธรณีวิทยา อุทกธรณีวิทยา ข้อมูลบ่อนบาดาล
  - ศึกษาวิธีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเมินทิศทางการไหลของน้ำบาดาล และการปนเปื้อนของไนเตรทในชั้นน้ำบาดาล
2. วิเคราะห์ข้อมูลโทรสัมพัทธ์
  - ข้อมูลความสูงภูมิประเทศเชิงเลข
  - ข้อมูลแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน
  - ลักษณะทางธรณีวิทยา
  - ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา
3. รวบรวมข้อมูล
  - ระดับน้ำในพื้นที่ศึกษา
  - ความสามารถในการสูบน้ำสูงสุดของแต่ละบ่อ
  - ปริมาณไนเตรทในพื้นที่ศึกษา
  - ปริมาณความสามารถในการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล
4. สร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์
  - ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ
  - ข้อมูลลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา
  - ข้อมูลการใช้น้ำบาดาล
5. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
  - ออกแบบกริดเซลล์จากแบบจำลองเชิงมโนทัศน์
  - กำหนดช่วงเวลาที่ทำการทดลอง
  - กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ยอมให้น้ำซึมผ่าน ค่าระดับน้ำเริ่มต้น และค่าระดับความปนเปื้อนเริ่มต้น เป็นต้น
6. อภิปรายและสรุปผลการศึกษา
7. จัดทำรูปเล่มรายงานและนำเสนอในรูปแบบสัมมนา

## แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มาจาก 2 แหล่งคือ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล และงานวิจัยที่ผ่านมา โดยข้อมูลที่ได้จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาลนั้น ได้แก่ ข้อมูลความสามารถสูงสุดในการสูบน้ำ ข้อมูลของชั้นน้ำ รวมถึงรายละเอียดข้อมูลบ่อต่างๆ ส่วนข้อมูลได้จากงานวิจัยนั้น เป็นข้อมูลที่ได้จากการออกภาคสนามของ

1. วิวิวัฒน โรจน์บวรวิทยา (2554) ระหว่างวันที่ 8 – 11 สิงหาคม 2554
2. วิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์ (2557) ระหว่างวันที่ 16 – 20 ตุลาคม 2557
3. เทวนพฤทธิ์ ภาคไชย (2558) ที่ได้ทำการวัดระดับน้ำ และปริมาณไนเตรทในน้ำบาดาล ระหว่างวันที่ 16 – 20 ตุลาคม 2557 และ 17 – 21 กุมภาพันธ์ 2558

### 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

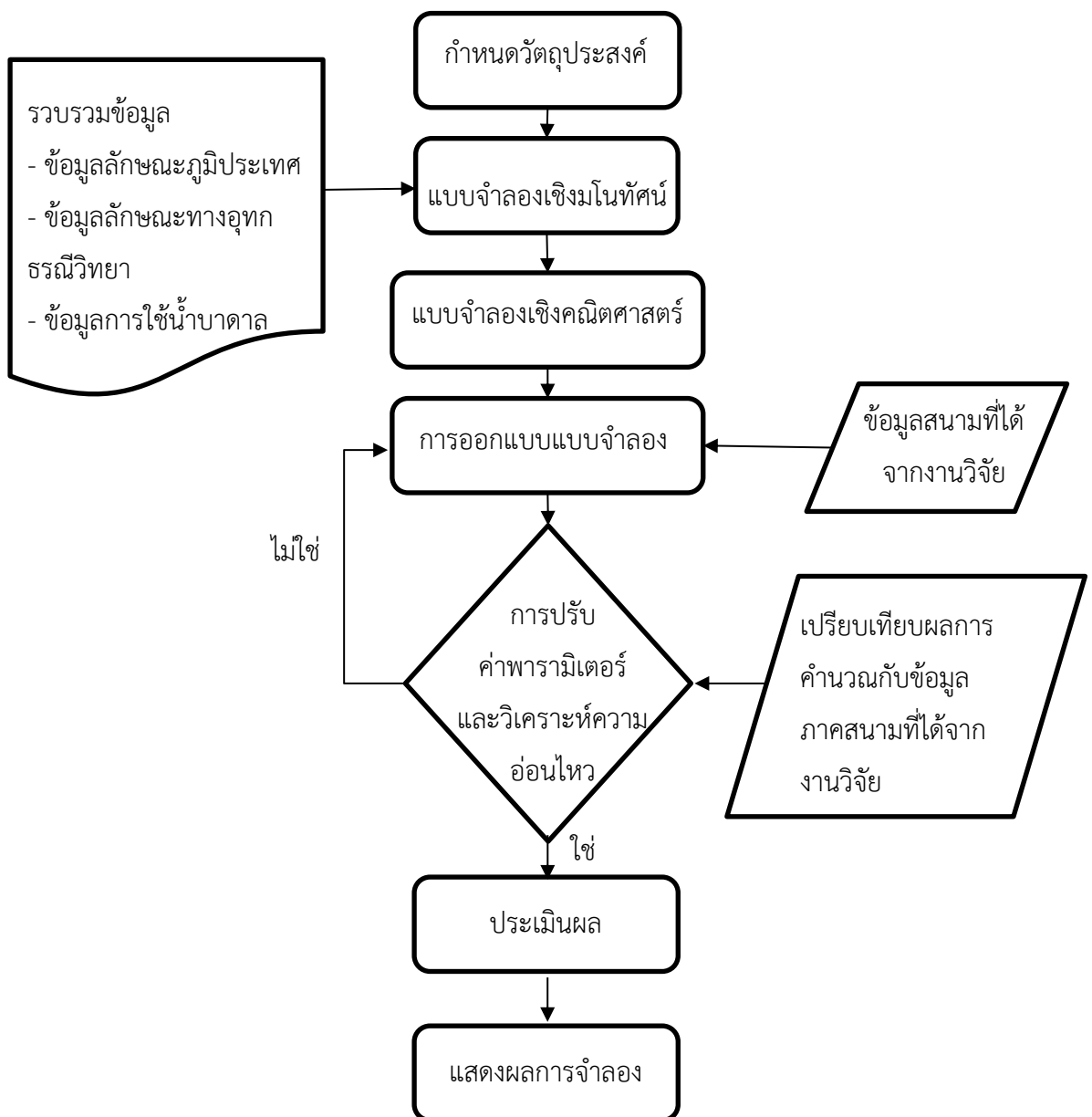
ในการวิเคราะห์การปนเปื้อนของไนเตรทในน้ำบาดาลโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณและจำลองสภาพต่างๆ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เพื่อประเมินสถานภาพปัจจุบันและคาดการณ์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอนาคต โดยอ้างอิงและดัดแปลงขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจาก Anderson and Woessner (2002) (รูปที่ 3.2) ดังนี้

1. การกำหนดวัตถุประสงค์ของการจำลอง เป็นการกำหนดกรอบงาน โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของไนเตรท
2. สร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เป็นการรวบรวมข้อมูลเพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา และสภาพทางชลศาสตร์ของพื้นที่ศึกษา
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อประเมินทิศทางการไหลของน้ำบาดาล และการปนเปื้อนไนเตรทบริเวณพื้นที่ศึกษา
4. การออกแบบแบบจำลอง เป็นการแปลงข้อมูลเชิงพื้นที่ออกเป็นหน่วยเล็กๆ จากนั้นกำหนดเงื่อนไขโดยนำเข้าข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดในแบบจำลอง (**ตารางที่ 3.1**) เช่น สภาพการนำชลศาสตร์ ค่าระดับน้ำเริ่มต้น และค่าระดับความปนเปื้อนเริ่มต้น เป็นต้น
5. การปรับค่าตัวแปรและวิเคราะห์ความอ่อนไหว ผลการจำลองที่ได้ต้องนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากภาคสนามที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน หากผลการจำลองไม่ตรงกับภาคสนามต้องการปรับค่าแบบ Trial and error จนกว่าจะได้ค่าที่ยอมรับได้



6. ประเมินผล เป็นการตรวจสอบความถูกต้องเพื่อแสดงว่าแบบจำลองนั้นสามารถเป็นตัวแทนของระบบอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาได้อย่างถูกต้อง
7. แสดงผลจำลอง เพื่อใช้แสดงให้เห็นภาพหรือผลลัพธ์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้น

### แผนผังขั้นตอนการออกแบบแบบจำลอง



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการออกแบบแบบจำลอง

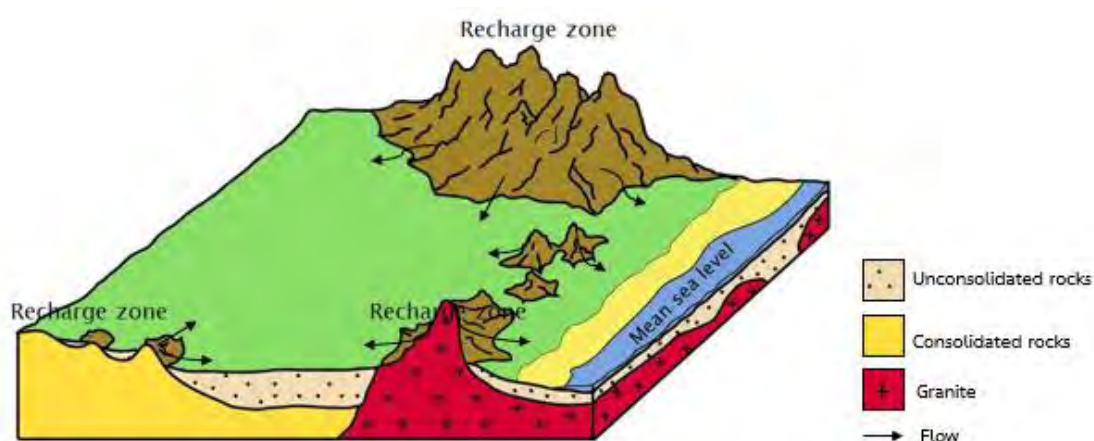
### 3.4 การกำหนดวัตถุประสงค์

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา โดยทำการจำลองกรณีต่างๆ 3 กรณี คือ

1. กรณีจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะคงที่
2. กรณีจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา
3. กรณีจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล

### 3.5 การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์

การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์เป็นการอธิบายลักษณะรูปร่าง ความหนา และคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นให้น้ำ ซึ่งพื้นที่ศึกษาประกอบด้วยชั้นน้ำที่มีความสามารถในการให้น้ำบาดาลจำนวน 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขา (Qfd) ชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรร อายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส (Pcms) และชั้นน้ำหินแกรนิต (Gr) (วิวิวรรณ โรจน์บวรวิทยา ,2554) อีกทั้งพบว่าบริเวณเทือกเขาในพื้นที่เป็นพื้นที่รับน้ำ ซึ่งไหลลงสู่กลางแอ่งซึ่งคาดว่าเป็นพื้นที่เติมน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (ดัดแปลงจากวิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์, 2557)

### 3.6 การออกแบบกริด

ในการจำลองได้แบ่งพื้นที่ศึกษา เป็นกริดเซลล์ขนาดเล็ก ขนาดกริด 300 เมตร × 300 เมตร โดยแบ่งในแนวตะวันออก-ตะวันตก 90 สดมภ์ (column) แนวเหนือ-ใต้ 90 แถว (row) และแบ่งความสูงของพื้นที่เป็น 3 ชั้น (layer) มีกริดเซลล์ทั้งหมด 24,300 กริดเซลล์ โดยในแบบจำลองได้มีการกำหนดเซลล์ที่ไม่ใช้คำนวณ (inactive cell) จำนวน 4,500 กริดเซลล์ หรือคิดเป็นจำนวนกริดเซลล์ที่ใช้คำนวณ (active cell) เท่ากับ 19,800 กริดเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4, 3.5 และ 3.6

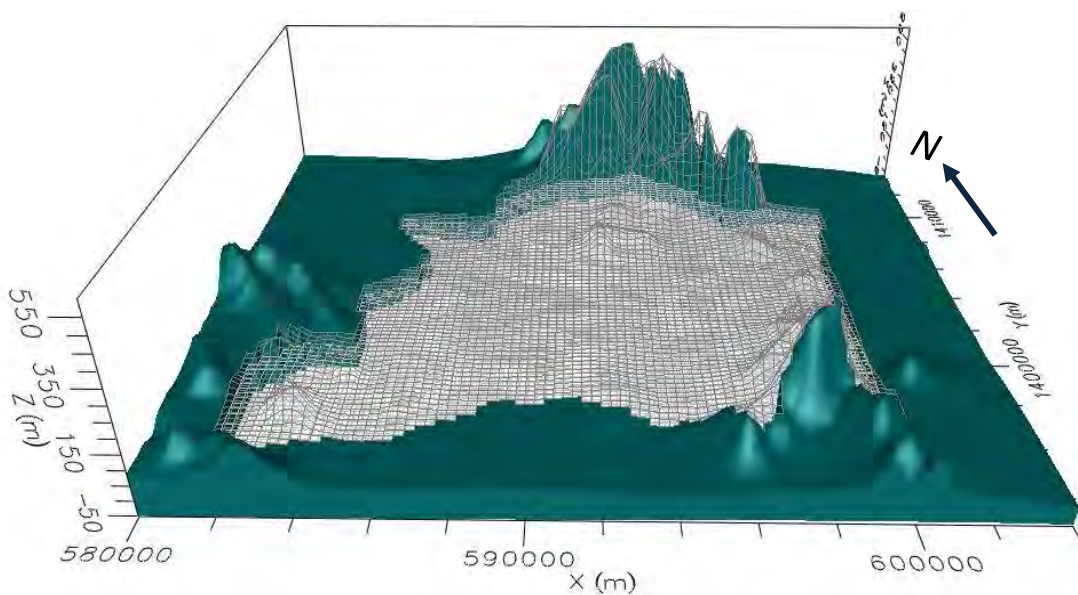


รูปที่ 3.4 การออกแบบกริดในแนวระนาบของแบบจำลอง





รูปที่ 3.5 การแบ่งชั้นของแบบจำลอง



รูปที่ 3.6 ลักษณะการแบ่งกริด ในแบบ สามมิติ

### 3.7 การกำหนดขอบเขตเริ่มต้นและขอบเขตเงื่อนไข (Initial and boundary condition)

แบบจำลอง Visual MODFLOW ต้องมีการกำหนดขอบเขตเริ่มต้นและขอบเขตเงื่อนไขให้กับแบบจำลองเพื่อใช้ในการคำนวณทั้งในสภาวะคงตัว (steady state) และสภาวะไม่คงตัว (transient state) ต่อไป โดยในการศึกษาครั้งนี้กำหนดขอบเขตเริ่มต้นและขอบเขตเงื่อนไขให้กับแบบจำลองตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

Parameters	รายละเอียด	แหล่งที่มา
Wells	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pumping wells 40 บ่อ</li> <li>- observed wells 42 บ่อ และ 14 บ่อ</li> <li>- concentration observed wells 25 บ่อ</li> </ul>	- วิววิวรรณ โรจน์บรรวิทยา (2554) วิศรุต เตชะสุวรรณ วงศ์ (2557) และเทวนพฤทธิ ภาคไชย (2558)
Aquifer type	- ในการศึกษาครั้งนี้สนใจชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำ หลากและตะกอนเชิงเขาและชั้นน้ำหิน ตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส เป็นหลัก เนื่องจากเป็นชั้นน้ำหลักในพื้นที่ ศึกษา	- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2552) และวิววิวรรณ โรจน์ บรรวิทยา (2554)
Hydraulic conductivity	- ใช้ข้อมูลของแต่ละบ่อคำนวณหาค่าสภาพ การนำชลศาสตร์ และนำมากำหนดค่าในช่วง คาบเกี่ยวกับ	- วิววิวรรณ โรจน์บรรวิทยา (2554) และ Domineco and Schwartz (1990)
Storage coefficient	- จำแนกเป็นค่ากักเก็บจำเพาะ ปริมาณ จำเพาะ และความพรุนประสิทธิผล โดยใช้ ข้อมูลจากการคำนวณจากผลการสูบทดสอบ และนำมากำหนดค่าในช่วงคาบเกี่ยวกับ	- Domenico and Mifflin (1965) , Heath (1983) และ Morris and Johnson (1967)
Constant head	- กำหนดให้ระดับน้ำคงที่บริเวณแหล่งน้ำผิวดิน (อ่างเก็บน้ำ) รายวันของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 โดยมีแหล่งน้ำผิวดิน 5 แห่ง คือ อ่างเก็บน้ำบ้านทุ่งขาม ห้วยตะ แปด วิโมกข์สันถ์ ห้วยทราย และห้วยไม้ ตาย มีค่าระดับน้ำคงที่เท่ากับ 87, 55.3, 50, 45 และ 87 ม.รทก. ตามลำดับ	- กรมชลประทาน (2560)
Drain	- กำหนดให้มีการระบายน้ำตามลักษณะ เส้นทางของลำห้วย โดยแต่ละกริดจะมีค่า การระบายน้ำ 1,000 ตารางเมตร/วัน	- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2554)

Recharge rates	- คิดเป็น 1-12% ของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี ตั้งแต่ปี 2554 – 2558 ของจังหวัดเพชรบุรี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 977, 898, 1137, 929 และ 794 mm./ปี ตามลำดับ โดยในแบบจำลองกำหนดบริเวณพื้นที่รับน้ำเป็นทั้งหมด 4 โซน คือ สูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำมาก คิดเป็นร้อยละ 3, 6, 9 และ 12 ของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย	- กรมอุตุนิยมวิทยาฯ(2558) และศุภลักษณ์ มุ่งดี (2555)
Initial head	- ระดับน้ำที่ได้จากการรวบรวม	- วิววิวรรณ โจรณ์บวรวิทยา (2554) วิศรุต เตชะสุวรรณ วงศ์ (2557) และเทวนพฤทธิ ภาคไชย (2558)
Dispersivity	- ค่าการแพร่กระจายในแนวตั้งมีค่าประมาณ 10% ของการแพร่กระจายในแนวราบ	- Spitz and Moreno (1996)
Recharge concentration	- ปริมาณไนเตรทที่ปนเปื้อนในดิน	- เทวนพฤทธิ ภาคไชย (2558)

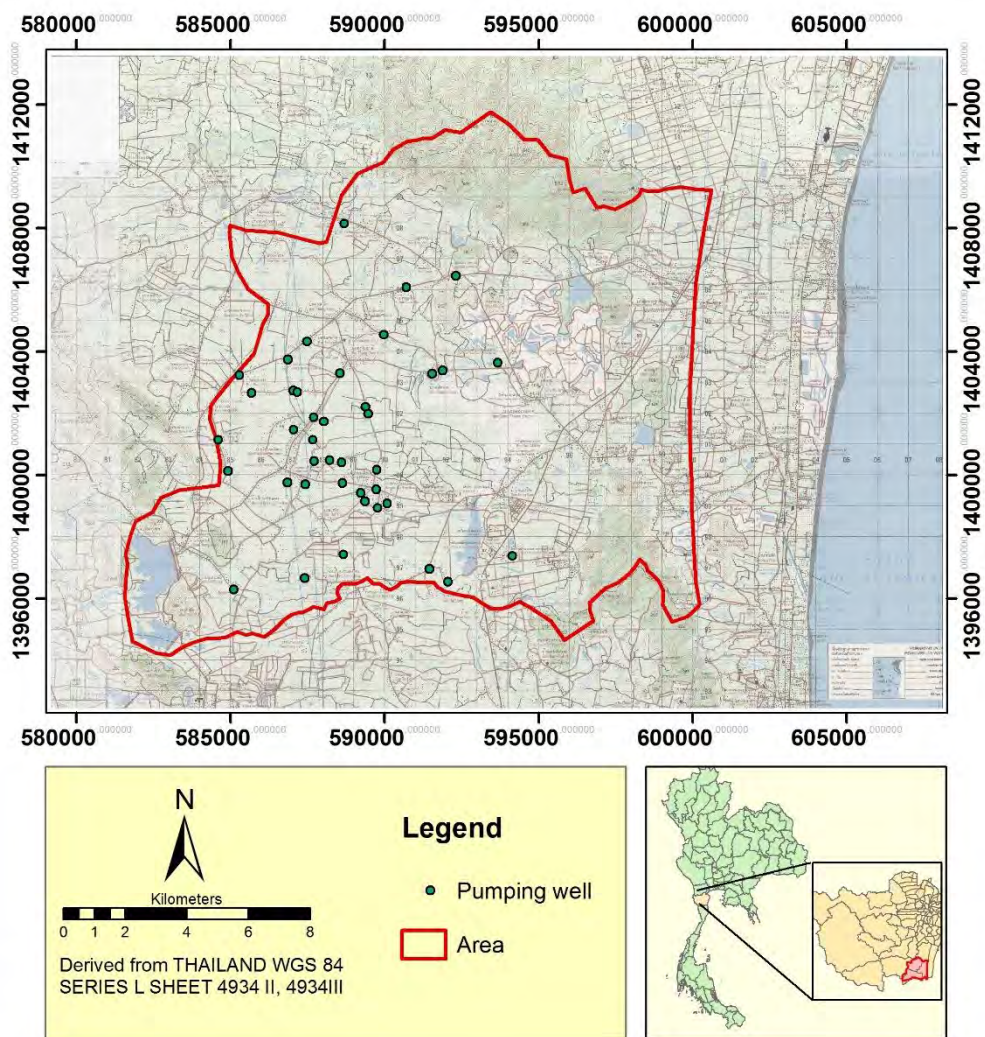
- คัดแยกข้อมูลบ่อที่ใช้ในแบบจำลองออกเป็น pumping wells observed wells และ concentration observed wells ดังแสดงในตารางที่ 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 และ 3.6 โดยตำแหน่งบ่อต่างๆจะแสดงในรูปที่ 3.7, 3.8, 3.9 และ 3.10

### ตารางที่ 3.2 ข้อมูล pumping wells

เลขบ่อ	Easting	Northing	Top screen (m)	Bottom screen (m)	Q (m <sup>3</sup> /day)	ระดับน้ำลด (m)	Aquifer type
C437	586846	1403744	27.50	21.50	-5	0.39	Qfd
C438	592307	1406465	74.00	68.00	-5	17.33	Qfd
C474	589722	1399543	9.45	3.45	-5	1.22	Qfd
C694	587689	1401865	8.92	2.92	-30	0.38	Qfd
MU100	589375	1402213	22.15	16.15	-3	0.6	Qfd

MU114	588653	1397423	12.00	6.00	-40	0.3	Qfd
MU117	585094	1396296	22.25	16.25	-0.04	1.5	Qfd
MU128	591439	1396959	35.35	29.35	-40	0.3	Qfd
MU257	591873	1403387	28.77	22.77	-35	14.1	Qfd
MU262	589957	1404549	19.10	13.10	-2	33	Pcms
MU279	587473	1404330	8.82	2.82	-30	9	Qfd
MU284	589460	1401991	16.48	10.48	-10	0.3	Qfd
MU314	587413	1399710	13.63	7.63	-5	0.51	Qfd
MU315	589738	1400174	14.29	8.29	-5	0.44	Qfd
MU316	587040	1401465	17.93	11.93	-5	0.5	Qfd
MU317	587657	1401144	22.13	16.13	-5	1.47	Qfd
MU319	584914	1400139	18.12	12.12	-0.5	35.3	Qfd
MU321	589347	1399153	23.06	17.06	-2	0.52	Qfd
MU325	587398	1396671	-0.23	-6.23	-40	0.98	Qfd
MU328	588628	1399743	8.93	2.93	-40	0.3	Qfd
MU337	588212	1400495	15.00	9.00	-40	2.95	Qfd
MU338	584591	1401146	17.48	14.48	-25	3.35	Pcms
MU339	592055	1396549	48.46	45.46	-40	0	Qfd
MU347	593673	1403653	28.28	22.28	-10	16.24	Qfd
MU379	594139	1397380	17.99	11.99	-4	24	Pcms
MU387	588594	1400413	18.51	12.51	-4	0	Qfd
MU393	586829	1399769	21.30	15.30	-4	31.49	Qfd
MU394	585682	1402670	31.71	25.71	-10	10.22	Qfd
MU434	590075	1399074	10.96	4.96	-50	3	Qfd
MU438	588681	1408152	43.79	37.79	-35	12	Pcms
MU464	590707	1406090	22.98	16.98	-4	9	Pcms
MU53	591539	1403291	28.50	22.50	-10	10.5	Qfd
MU576	589764	1398926	14.50	10.50	-3	12	Qfd
MU623	587025	1402745	32.15	26.15	-3	6	Qfd

MU662	589218	1399417	10.81	1.81	-3	2	Qfd
MU663	587703	1400454	23.99	5.99	-3	2	Qfd
MU82	585282	1403253	-6.29	-12.29	-4	48	Pcms
MU96	587156	1402703	25.87	19.87	-40	0.44	Qfd
MU97	588545	1403302	26.38	20.38	-25	9	Qfd
MU99	588013	1401739	26.46	20.46	-1	0.08	Qfd



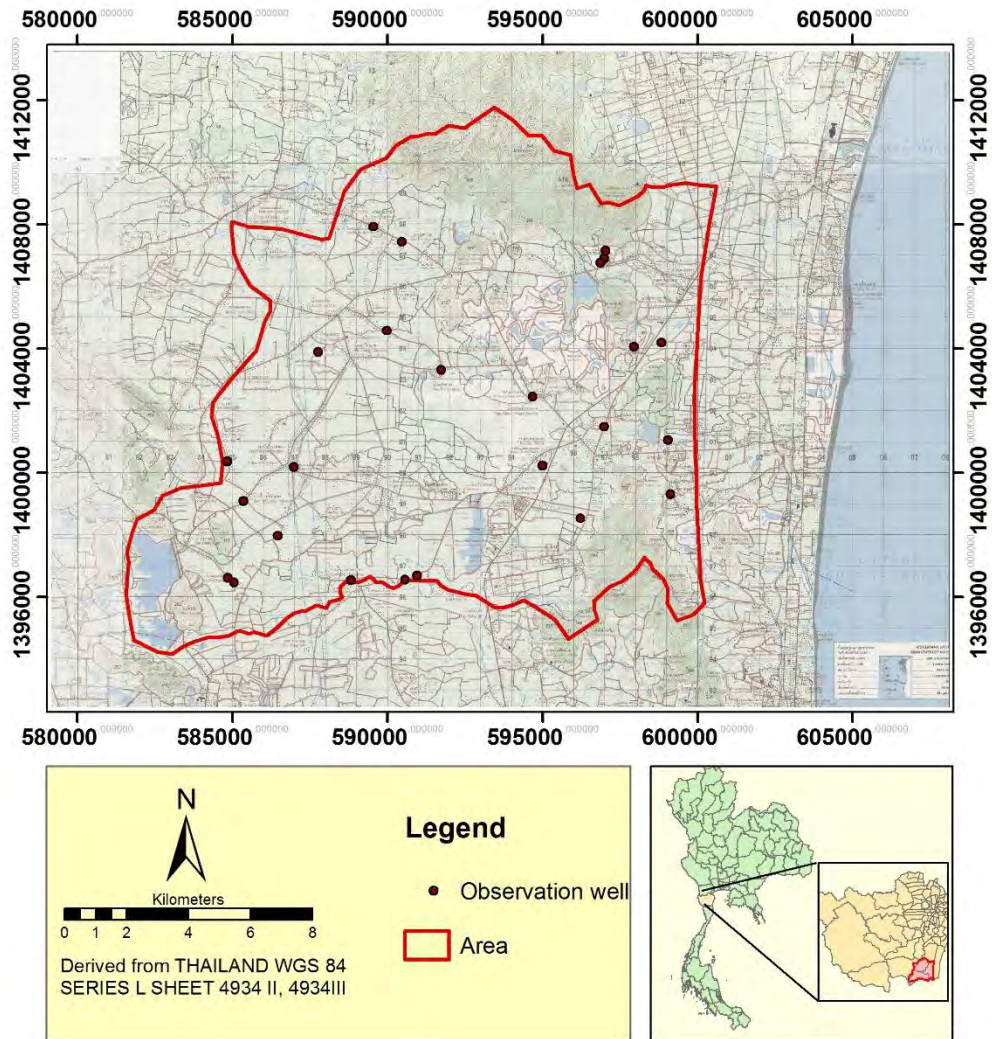
รูปที่ 3.7 แผนที่แสดงตำแหน่ง pumping wells



ตารางที่ 3.3 ข้อมูล observation wells วันที่ 8-11 สิงหาคม 2554 (วิวิวรรณ โจนน์บวรวิทยา, 2554)

เลขบ่อ	Easting	Northing	Z (m)	ระดับน้ำ (m)	Average screen (m)
C373	598516	1406647	40.4779	37.8879	13.4779
C475	586510	1405426	40.8630	32.1030	7.8630
C476	591632	1403030	56.9116	46.8316	23.9116
MU102	587648	1404469	51.4346	43.9346	-5.5654
MU106	590942	1396698	71.7670	66.3670	26.7670
MU108	588845	1400588	58.2142	46.2142	19.2142
MU109	587637	1399380	61.4466	45.5466	16.4466
MU110	586616	1400981	60.4075	46.9075	15.4075
MU112	585173	1398537	67.0765	67.0765	28.0765
MU113	585928	1398992	74.1290	69.6290	23.1290
MU126	589533	1407935	90.6097	81.6097	54.6097
MU127	594580	1402593	59.2007	56.2007	20.2007
MU135	596966	1401483	57.3539	51.3539	30.3539
MU190	595148	1400703	57.7901	48.1901	12.7901
MU260	586652	1403724	51.5006	42.5006	18.5006
MU263	594501	1406431	67.7419	60.2419	46.7419
MU285	589055	1399676	59.4643	51.0643	8.4643
MU287	599483	1406364	24.5873	18.2873	-18.9127
MU311	584231	1397254	64.9170	61.9170	37.9170
MU313	583756	1397518	69.7462	58.3462	24.7462
MU318	586397	1397438	73.4083	73.1083	52.4083
MU326	588800	1396541	60.1612	48.1612	9.1612
MU385	589379	1404882	61.0428	59.0428	34.0428
MU435	587517	1399062	64.6474	58.6474	13.6474
MU436	586496	1401720	59.9857	47.9857	20.9857

MU439	586454	1397964	74.5344	72.5344	23.5344
MU441	596149	1401179	58.0702	56.0702	31.0702
MU443	591818	1396852	82.5859	76.5859	43.5859
MU454	583486	1397630	80.1264	76.1264	29.1264
MU463	588377	1399789	59.9987	47.9987	20.9987
MU465	588107	1400359	60.0007	48.0007	15.0007
MU54	590542	1399237	59.8440	50.8440	14.8440
MU572	588160	1400532	60.0047	48.0047	14.0047
MU573	587612	1400182	60.1553	45.1553	16.1553
MU574	587256	1400005	62.0077	47.0077	18.0077
MU575	589313	1399678	58.5490	46.5490	14.5490
MU577	587024	1397273	69.5661	59.5661	23.5661
MU599	589451	1405754	69.4428	64.6428	35.1928
MU644	587746	1403903	50.9550	41.8150	14.3800
MU747	598249	1406446	39.9980	37.9980	1.9980
MU81	588391	1405073	57.8766	56.3566	29.8766
MU95	589461	1403722	56.6215	50.6215	-9.3785

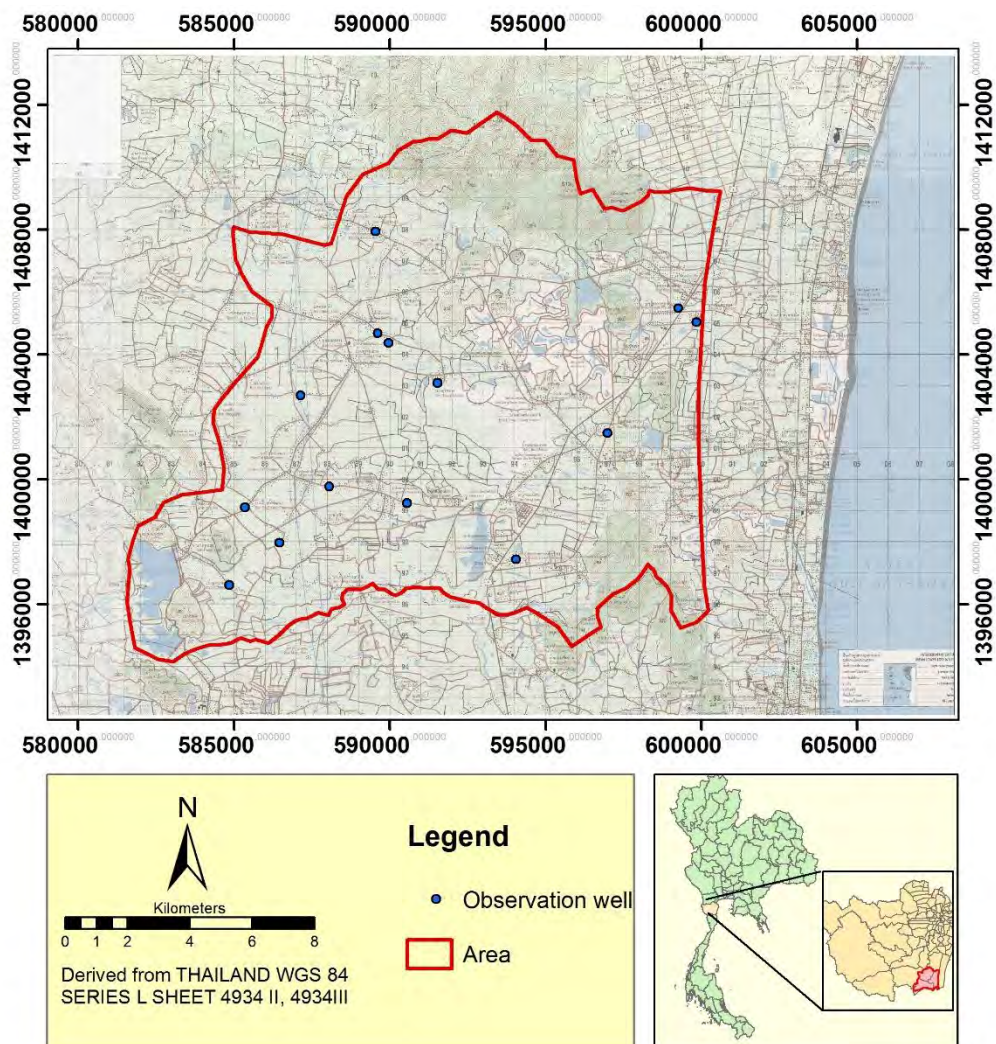


รูปที่ 3.8 แผนที่แสดงตำแหน่ง observation wells (วิวิวรรณ โจนน์บรรณวิทยา, 2554)

ตารางที่ 3.4 ข้อมูล observed wells วันที่ 16-20 ตุลาคม 2557 (วิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์, 2557)

เลขบ่อ	Easting	Northing	Z (m)	ระดับน้ำ (m)	Average screen (m)
5208C002	594036	1397437	60.00	47.25	-16.0046
5508C020	588043	1399776	60.00	41.60	16.9996
DCD14793	585338	1399103	72.66	70.36	39.6604
DCD14836	589953	1404379	60.19	55.59	21.1925
MU126	589532	1407940	90.61	87.53	54.6097
MU135	596969	1401483	57.35	54.90	30.3539

MU259	584826	1396622	60.26	56.36	-2.7372
MU439	586449	1397967	74.53	71.63	23.5344
MU54	590537	1399238	59.84	47.54	14.8440
MU624	591521	1403091	57.46	54.96	0.4593
MU96	587135	1402704	56.16	43.26	23.1593
PCR9	599255	1405480	33.12	28.85	-42.8775
จ1642	599832	1405039	40.22	33.52	-6.7787
จ1652	589601	1404682	60.67	57.07	-4.3302



รูปที่ 3.9 แผนที่แสดงตำแหน่ง observation wells (วิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์, 2557)

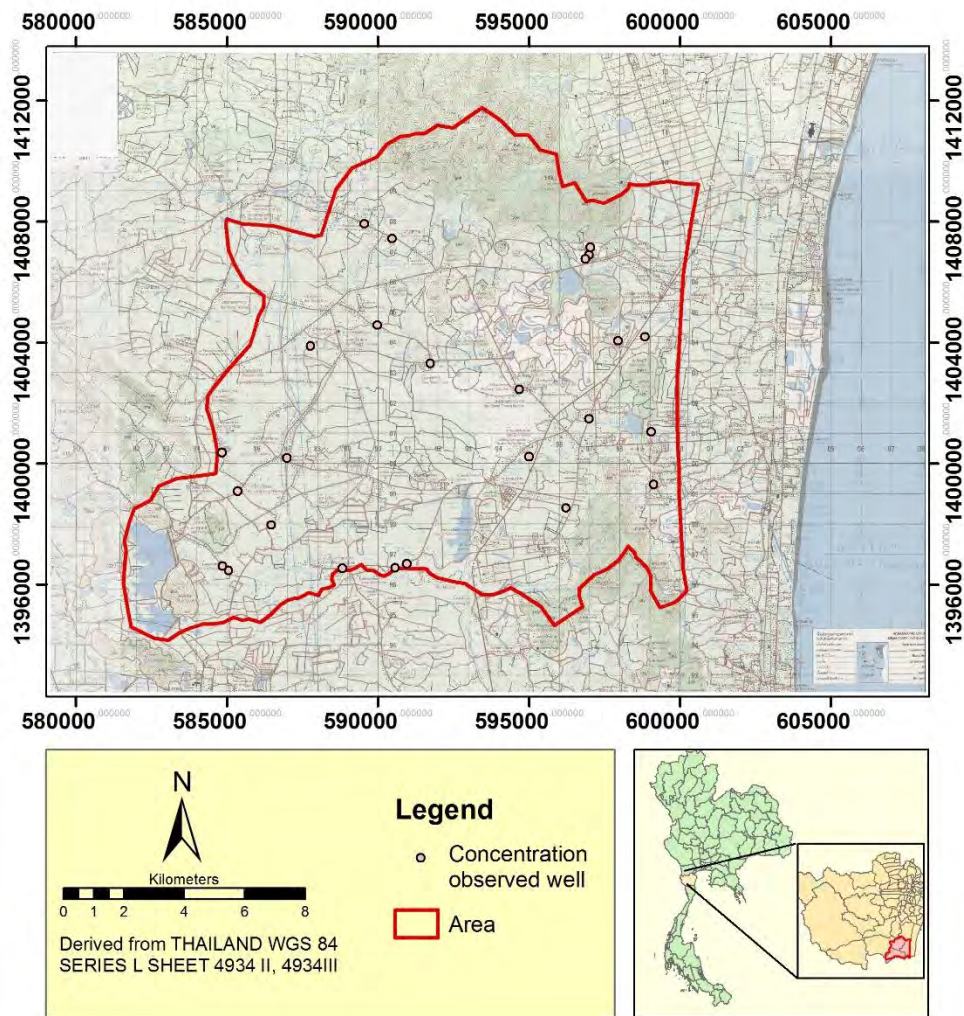
ตารางที่ 3.5 ข้อมูล concentration ของ observation wells ของวันที่ 16-20 ตุลาคม 2557 (เทวนพฤทธิ ภาคไชย, 2558)

เลขบ่อ	Easting	Northing	Average screen (m)	Observation time (day)	Concentration (mg/l)
5408D001	597022	1407165	4.7264	285	6.137
5408D002	596971	1406904	18.0969	285	0.01
5408D007	590451	1407442	34.0325	285	0.01
5708C021	585040	1396467	1.2571	285	0.155
5908C047	597933	1404058	16.7463	285	2.865
5908C048	596858	1406777	12.0969	285	0.047
AFD8798	594987	1400231	-17.5607	285	1.908
DCD14805	584815	1400376	14.8274	285	46.852
DCD14809	598833	1404187	-7.1063	285	4.391
DCD14811	599033	1401047	5.2878	285	16.554
DCD14818	594678	1402465	13.1667	285	0.916
DCD14825	599119	1399322	10.3865	285	10.927
DCD14836	589955	1404579	23.6009	285	8.616
DCD17493	585339	1399101	8.1604	285	2.514
MU106	590942	1396698	26.7670	285	2.825
MU116	590549	1396562	30.7064	285	0.168
MU126	589533	1407935	54.6097	285	0.114
MU130	591718	1403322	31.5062	285	0.077
MU135	596966	1401483	30.3539	285	4.566
MU259	584826	1396624	-2.7372	285	0.01
MU326	588800	1396541	9.1612	285	12.755
MU327	586971	1400197	19.3613	285	49.741
MU439	586454	1397964	23.5344	285	0.637
MU644	587746	1403903	14.3800	285	0.904
TL4	596219	1398536	9.2338	285	22.438

ตารางที่ 3.6 ข้อมูล concentration ของ observation wells ของวันที่ 17-21 กุมภาพันธ์ 2557  
(เทวนพฤทธิ ภาคไชย, 2558)

เลขบ่อ	Easting	Northing	Average screen (m)	Observation time (day)	Concentration (mg/l)
5408D001	597022	1407165	4.7264	50	2.52
5408D002	596971	1406904	18.0969	50	1.73
5408D007	590451	1407442	34.0325	50	2.52
5708C021	585040	1396467	1.2571	50	0.19
5908C047	597933	1404058	16.7463	50	1.05
5908C048	596858	1406777	12.0969	50	1.83
AFD8798	594987	1400231	-17.5607	50	5.75
DCD14805	584815	1400376	14.8274	50	1.82
DCD14809	598833	1404187	-7.1063	50	0
DCD14811	599033	1401047	5.2878	50	2.41
DCD14818	594678	1402465	13.1667	50	0.85
DCD14825	599119	1399322	10.3865	50	0
DCD14836	589955	1404579	23.6009	50	1.95
DCD17493	585339	1399101	8.1604	50	4.09
MU106	590942	1396698	26.7670	50	0
MU116	590549	1396562	30.7064	50	0.55
MU126	589533	1407935	54.6097	50	0
MU130	591718	1403322	31.5062	50	1.77
MU135	596966	1401483	30.3539	50	2.54
MU259	584826	1396624	-2.7372	50	2.78
MU326	588800	1396541	9.1612	50	0.77
MU327	586971	1400197	19.3613	50	1.76
MU439	586454	1397964	23.5344	50	1.81
MU644	587746	1403903	14.3800	50	1.95
TL4	596219	1398536	9.2338	50	0





รูปที่ 3.10 แผนที่แสดงตำแหน่ง concentration ของ observation wells

### 3.7.1 สภาพการนำชลศาสตร์ (Hydraulic conductivity, K)

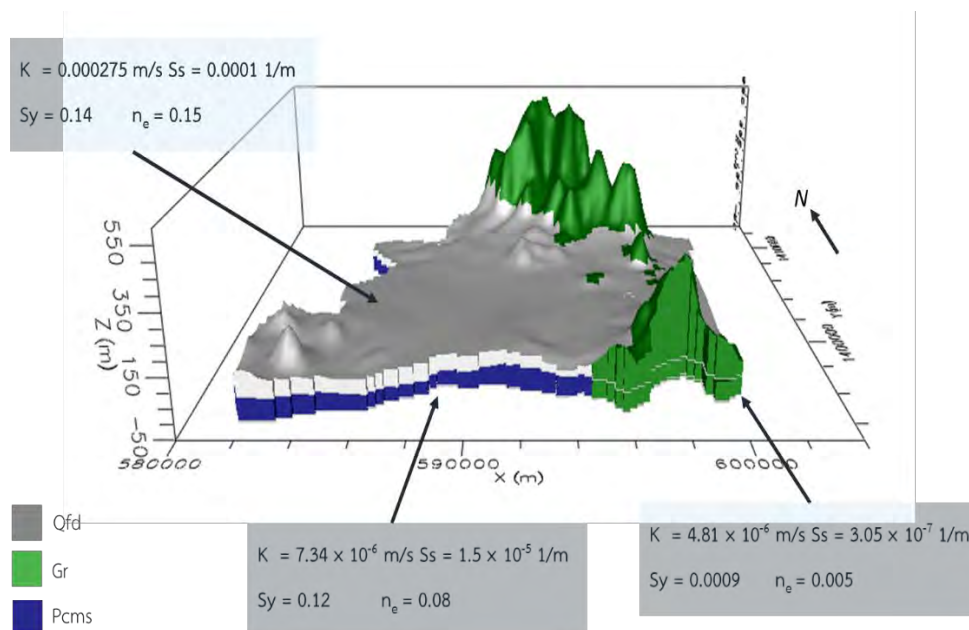
สภาพการนำชลศาสตร์ได้จากการคำนวณของผลการสุบทดสอบของงานวิจัยวิวิวรรณ โรจน์บวรวิทยา (2554) โดยแบบจำลองนี้กำหนดให้ค่าดังกล่าวมีค่าเท่ากันทุกแนว ( $K_x = K_y = K_z$ ) คือ โดยชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขา มีค่าเท่ากับ  $2.75E-4$  m/s (หรือ 23.76 m/day) ชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส มีค่าเท่ากับ  $7.34E-6$  m/s (หรือ 0.63 m/day) และชั้นน้ำหินแกรนิต มีค่าเท่ากับ  $4.81E-6$  m/s (หรือ 0.42 m/day) (รูปที่ 3.11)

### 3.7.2 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Specific storage, S)

ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บได้จากงานศึกษาของ Domenico and Mifflin (1965), Heath (1983) และ Morris and Johnson (1967) โดยแบบจำลองนั้นน้ำเข้า 2 ค่า คือ การกักเก็บจำเพาะ ( $S_s$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ ( $S_y$ ) โดยชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขา มีค่า  $S_s$  เท่ากับ  $0.0001 \text{ m}^{-1}$  และ  $S_y$  เท่ากับ  $0.14$  ชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส มีค่า  $S_s$  เท่ากับ  $1.5\text{E-}5 \text{ m}^{-1}$  และ  $S_y$  เท่ากับ  $0.12$  ส่วนชั้นน้ำหินแกรนิต มีค่า  $S_s$  เท่ากับ  $3.05\text{E-}7 \text{ m}^{-1}$  และ  $S_y$  เท่ากับ  $0.0009$  (รูปที่ 3.11)

### 3.7.1 ความพรุนประสิทธิผล (Effective porosity, $n_e$ )

แบบจำลองต้องกำหนดค่าความพรุนเพื่อนำไปใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของมวลสาร โดยกำหนดให้ชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขา มีค่า  $n_e$  เท่ากับ  $0.15$  ชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส มีค่า  $n_e$  เท่ากับ  $0.08$  และชั้นน้ำหินแกรนิต มีค่า  $n_e$  เท่ากับ  $0.005$  (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 ภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ และความพรุนของแบบจำลองในรูปแบบสามมิติ



### 3.7.4 ขอบเขตระดับน้ำคงที่ (Constant head)

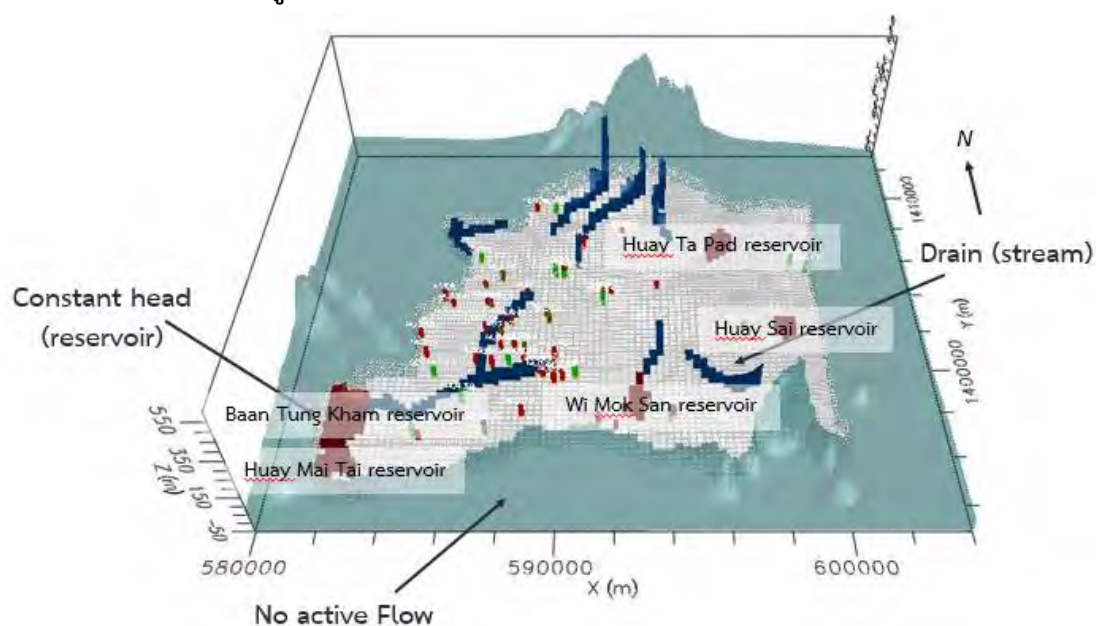
ค่าระดับน้ำคงที่บริเวณแหล่งน้ำผิวดิน (อ่างเก็บน้ำ) มีค่าระดับน้ำคงที่เท่ากับค่าระดับน้ำรายวันของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 โดยมีแหล่งน้ำผิวดิน 5 แห่ง ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.7 และ รูปที่ 3.12

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลรายละเอียดของอ่างเก็บน้ำ

อ่างเก็บน้ำ	ความจุ (ล้าน ลบ.ม.)	ระดับความสูง (ม.รทก.)
บ้านทุ่งขาม	8.00	87
ห้วยตะแปด	4.00	55.3
วิโมกข์สวรรค์	2.00	50
ห้วยทราย	1.95	45
ห้วยไม้ตาย	3.70	87

### 3.7.5 การระบายน้ำ (Drain)

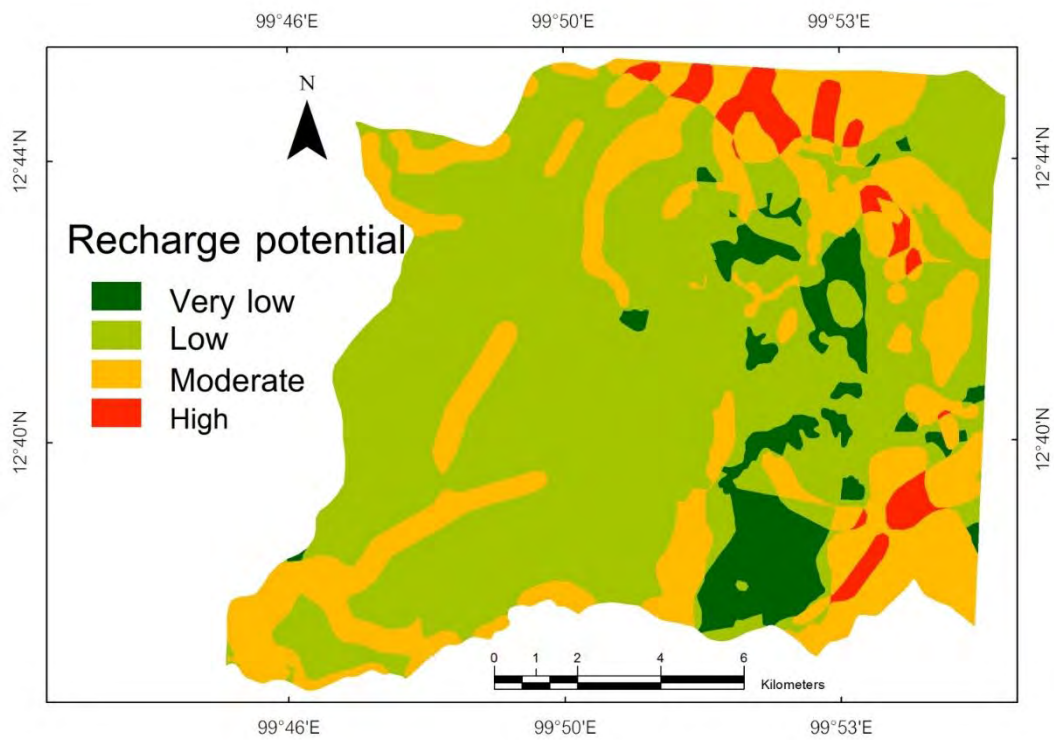
กำหนดขอบเขตประเภนี้เป็นพื้นที่ที่มีการระบายน้ำตามลักษณะเส้นทางของลำธาร โดยแต่ละกริดเซลล์จะมีค่าการระบายน้ำ 1,000 ตารางเมตร/วัน ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณพื้นที่ผิวของลำน้ำประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2552) (รูปที่ 3.12)



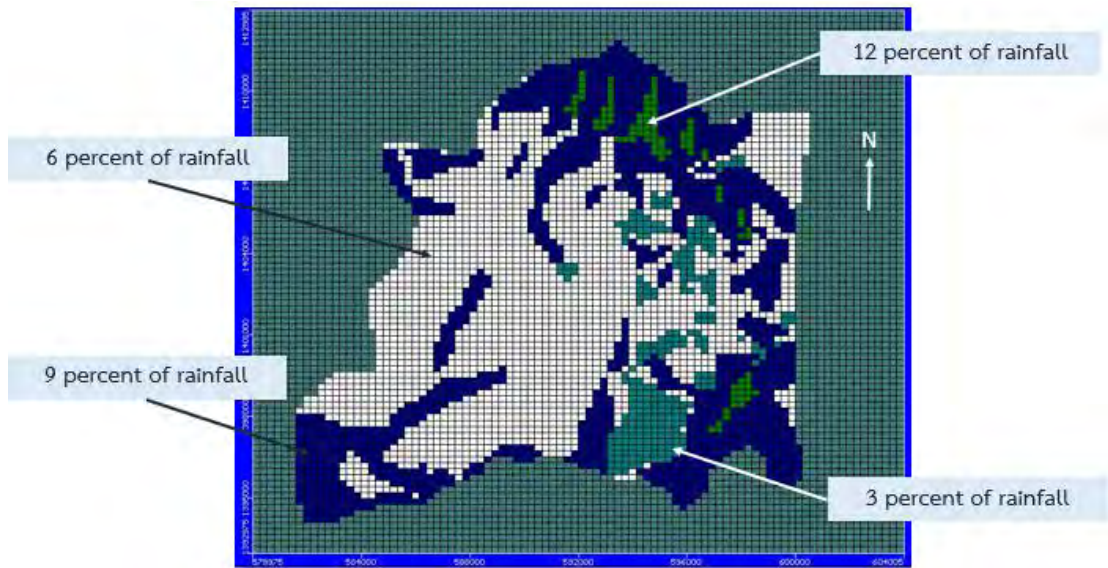
รูปที่ 3.12 ภาพแสดงค่าสภาพการนำชลศาสตร์ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ และความพรุนของแบบจำลองในรูปแบบสามมิติ

### 3.7.6 อัตราการเติมน้ำ (Recharge)

ศักยภาพในการเติมน้ำได้จากการประเมินตามพื้นที่ ได้แก่ ลักษณะทางธรณีวิทยา โครงสร้างเชิงเส้น การใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน และความหนาแน่นลำน้ำ (ศุภลักษณ์ มุ่งดี, 2555) พบว่าพื้นที่ศักยภาพในการเติมน้ำแบ่งเป็น 4 ระดับ คือ สูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำมาก (รูปที่ 3.13) เมื่อนำเข้าข้อมูลดังกล่าวในแบบจำลองจะได้พื้นที่เติมน้ำ 4 โซน (รูปที่ 3.14) โดยมีช่วงการเติมน้ำอยู่ที่ ร้อยละ 3, 6, 9 และ 12 ของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตาม ตารางที่ 3.1



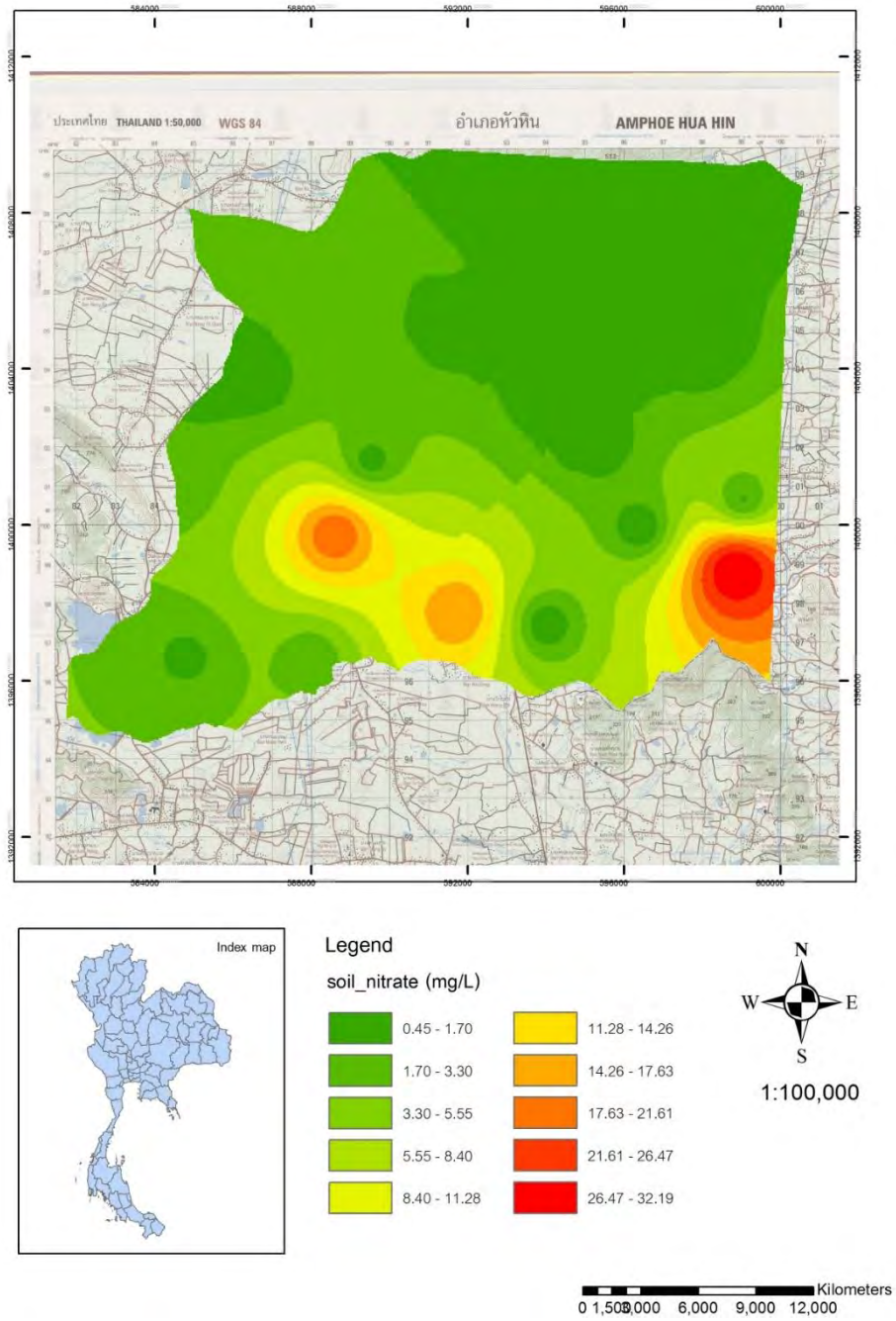
รูปที่ 3.13 ภาพแสดงผลการจำลองพื้นที่ศักยภาพน้ำบาดาล (ศุภลักษณ์ มุ่งดี, 2555)



รูปที่ 3.14 พื้นที่การเติมน้ำในแบบจำลอง

### 3.7.7 อัตราการเติมความเข้มข้นของปริมาณไนเตรท (Nitrate recharge concentration)

อัตราการเติมความเข้มข้นของปริมาณไนเตรทได้จากข้อมูลการปนเปื้อนของไนเตรทในดินของ เทวนพฤทธิ ภาคไชย (2558) ในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 และนำข้อมูลมาสร้างแผนที่เส้นชั้นแสดงความเข้มข้นของปริมาณไนเตรท ทำให้ได้ลักษณะการกระจายตัวเริ่มต้นของปริมาณไนเตรทในพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 3.15)



รูปที่ 3.15 แผนที่แสดงการปนเปื้อนไนเตรทในดิน (เทวนพฤทธิ์ ภาคไชย,2558)

### 3.8 การทดสอบความไหวของตัวแปรในแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองคือการจำลองซ้ำ โดยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองหลังจากการปรับแก้ค่าสมบูรณ์แล้ว เพื่อใช้ในการพิจารณาว่าแต่ละพารามิเตอร์มีผลต่อแบบจำลองมากน้อยเพียงใด

ในการศึกษานี้ได้วิเคราะห์ความอ่อนไหวของอัตราการเติมความเข้มข้นของปริมาณไนเตรทสภาพการนำคลศาสตร์ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย โดยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์แต่ละพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นและลดลงร้อยละ 10 20 และ 30 โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของปริมาณไนเตรทที่เปลี่ยนแปลง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ กับค่าเฉลี่ยของระดับน้ำบาดาลและปริมาณไนเตรทที่เปลี่ยนแปลง

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

การจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการแพร่กระจายของไนเตรท โดยจำลองทั้งหมด 3 กรณี จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดระดับน้ำและคุณภาพน้ำของบ่อสังเกตการณ์ และปรับค่าพารามิเตอร์จนให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

#### 4.1 การจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะคงที่ (Steady state condition)

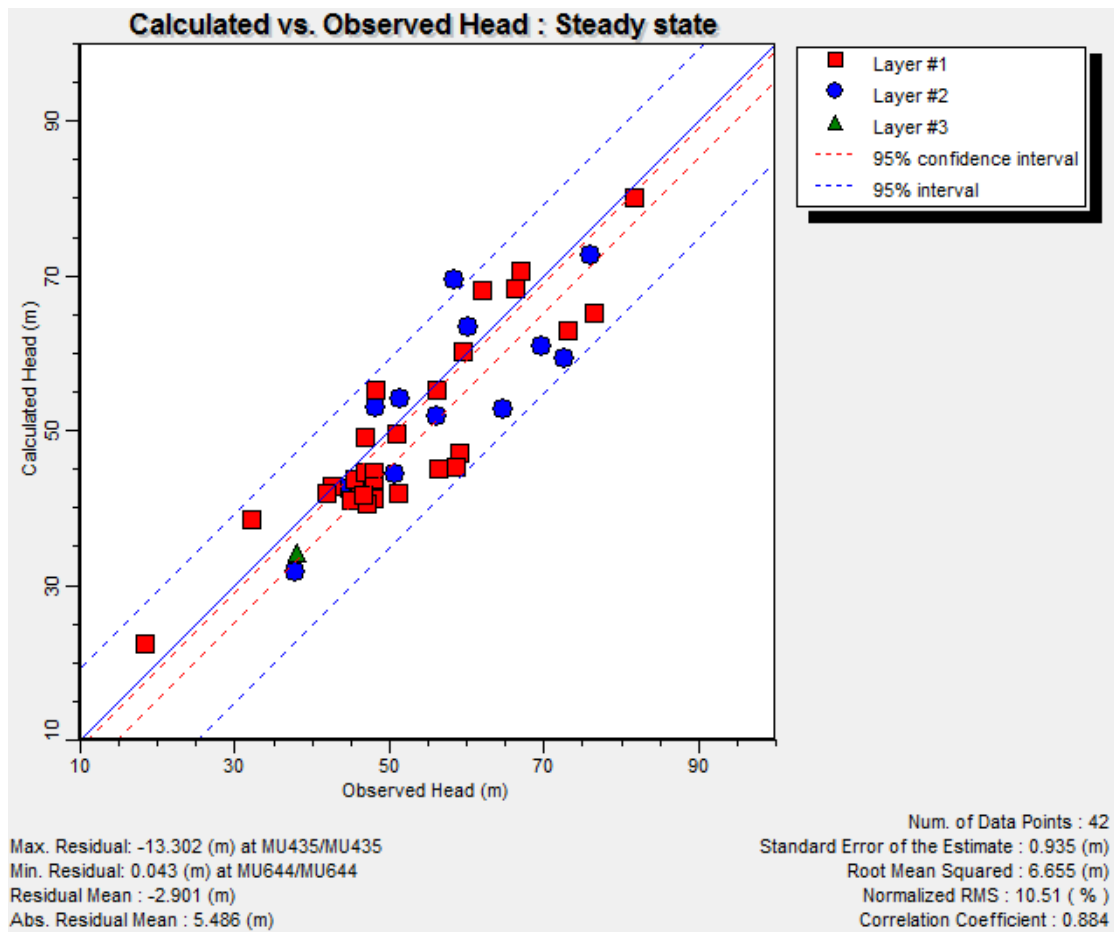
การจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะคงที่เป็นการจำลองเบื้องต้นที่ใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินเบื้องต้น และตรวจสอบความเป็นไปได้ของสภาพขอบเขตแบบจำลอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น สภาพการนำชลศาสตร์ (hydraulic conductivity), ค่าระดับน้ำคงที่ (constant head), การระบายน้ำ (drain) และค่าระดับน้ำเริ่มต้น (initial head) ตามตารางที่ 3.1 เป็นต้น

แบบจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะคงที่ได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่นำเข้ามาแบบจำลองจนค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าระดับน้ำที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์มากที่สุด โดยใช้ข้อมูลระดับน้ำจากงานวิจัยของวิวิวรรณ โรจน์บรรวิทย์ (2554) (ตารางที่ 3.3) และวิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์ (2557) (ตารางที่ 3.4)

ผลการจำลองที่ใช้ข้อมูลค่าระดับน้ำจากงานวิจัยของวิวิวรรณ โรจน์บรรวิทย์ (2554) มีความคลาดเคลื่อนของค่าระดับที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์และค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองแสดงใน รูปที่ 4.1 ดังนี้

Standard error of the estimate:	0.935 m
Root mean squared:	6.655 m
Normalized RMS:	10.51%
Correlation coefficient:	0.884

โดยผลการจำลองส่วนใหญ่อยู่ภายในช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์



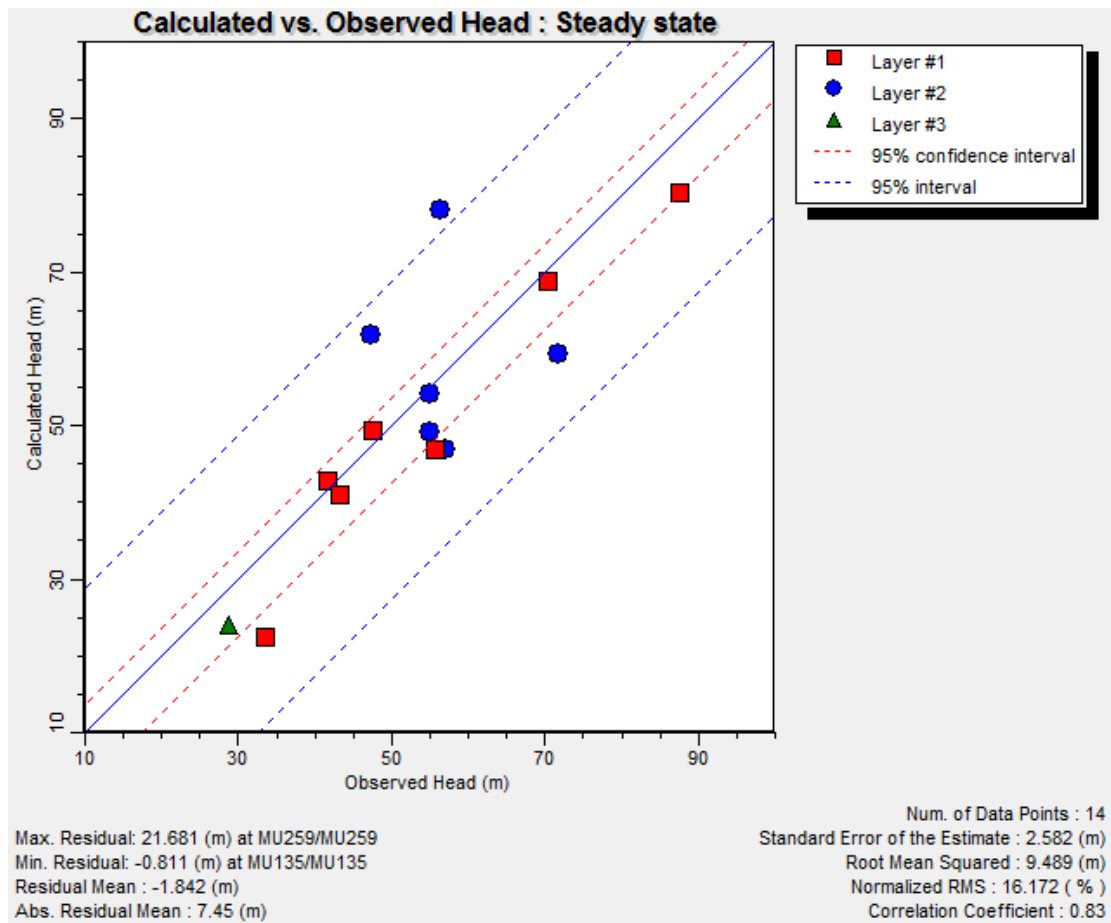
**รูปที่ 4.1** ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่ปี 2554

ผลการจำลองที่ใช้ข้อมูลค่าระดับน้ำจากงานวิจัยของวิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์ (2557) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เดียวกันกับกรณีที่แล้ว พบว่าความคลาดเคลื่อนของค่าระดับน้ำที่วัดได้จากข้อสังเกตการณ์และค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองแสดงใน **รูปที่ 4.2** ดังนี้

Standard error of the estimate:	2.582 m
Root mean squared:	9.489 m
Normalized RMS:	16.172%
Correlation coefficient:	0.83

โดยผลการจำลองส่วนใหญ่อยู่ภายในช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์





รูปที่ 4.2 ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่ปี 2557

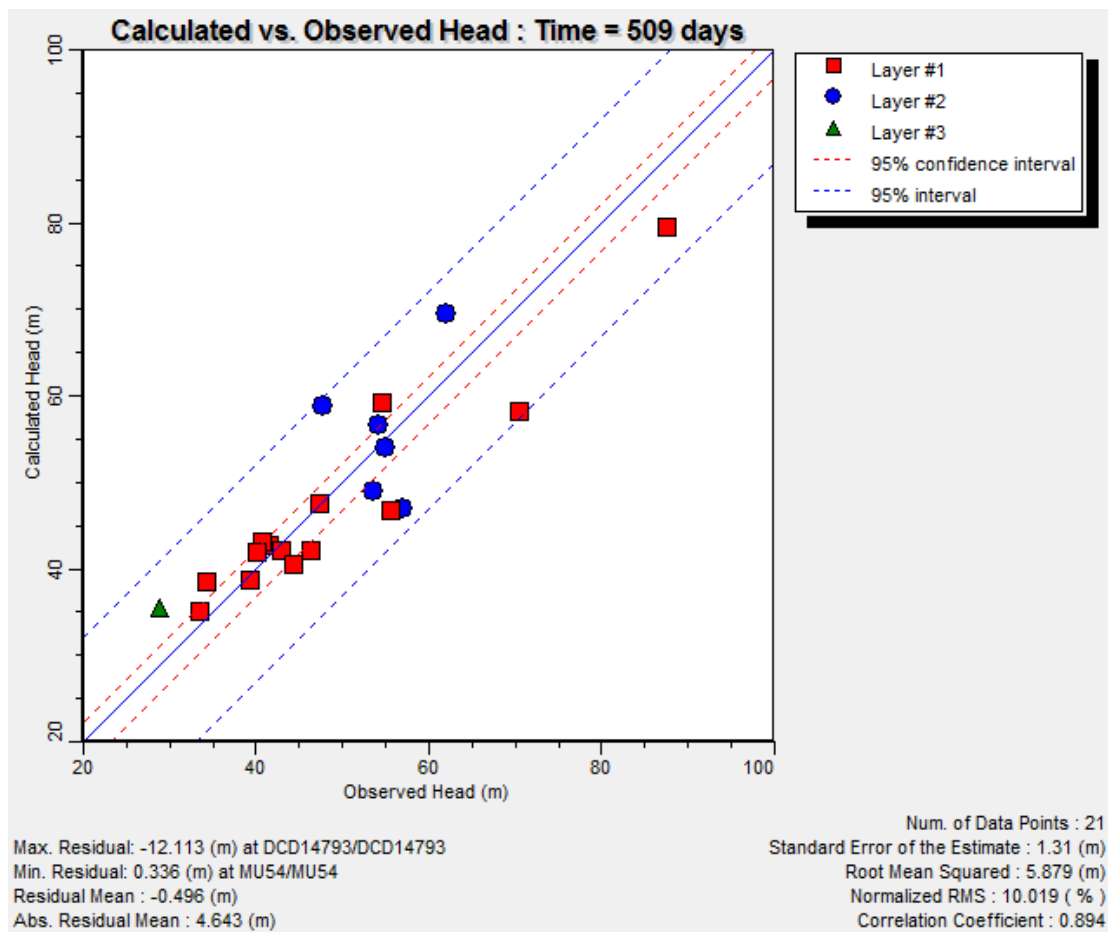
ผลการจำลองแบบสภาวะคงที่มีความสอดคล้องกับแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ โดยทิศทางการไหลของน้ำบริเวณเทือกเขาในพื้นที่เป็นพื้นที่รับน้ำ และไหลลงสู่ลงกลางแอ่งซึ่งเป็นพื้นที่เติมน้ำ (รูปที่ 4.3)





Standard error of the estimate:	1.31 m
Root mean squared:	5.879 m
Normalized RMS:	10.019 %
Correlation coefficient:	0.894

โดยผลการจำลองส่วนใหญ่อยู่ภายในช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์



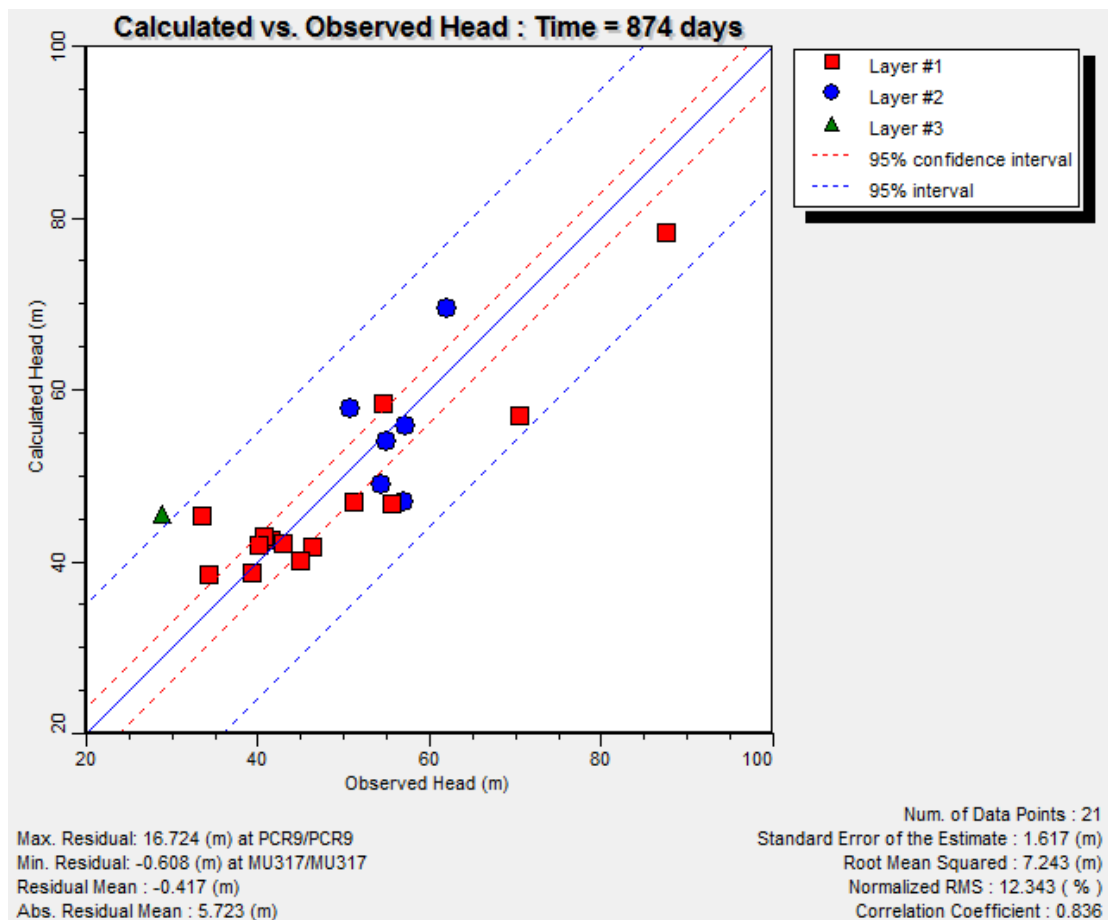
**รูปที่ 4.4** ผลการจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา

(มกราคม พ.ศ. 2556)

ผลการจำลองการไหลของน้ำบาดาลในเดือน มกราคม พ.ศ. 2557 พบว่าความคลาดเคลื่อนของค่าระดับน้ำที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์และค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองดังแสดงใน รูปที่ 4.5 ดังนี้

Standard error of the estimate:	1.617 m
Root mean squared:	7.243 m
Normalized RMS:	12.343 %
Correlation coefficient:	0.836

โดยผลการจำลองส่วนใหญ่อยู่ภายในช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์

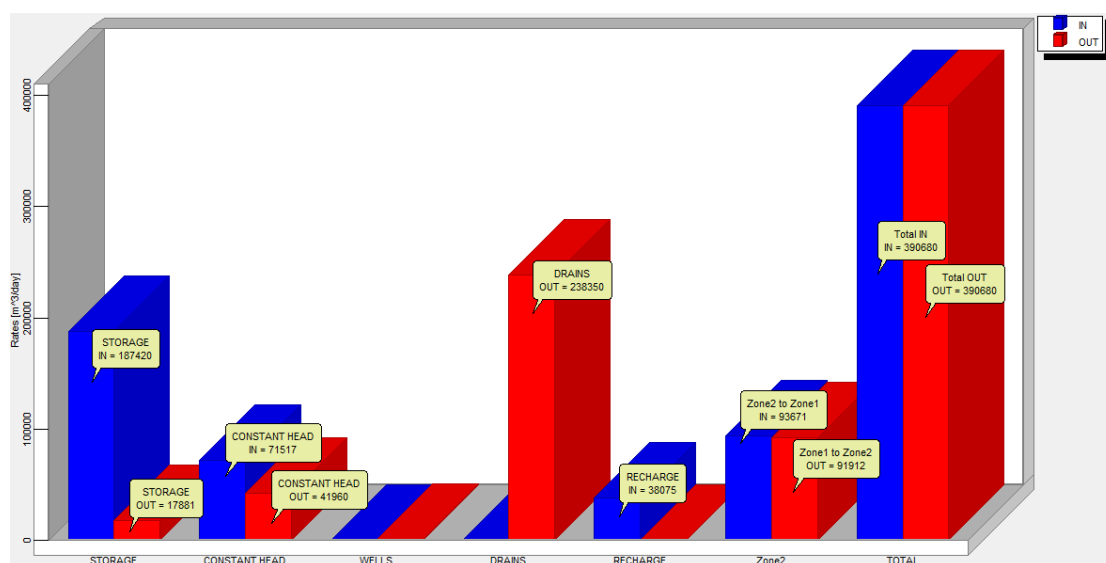


#### รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา

(มกราคม พ.ศ. 2557)

ผลการจำลองการไหลของน้ำบาดาลพบว่า การไหลของน้ำบาดาลแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา มีรูปแบบคล้ายกับอัตราการไหลแบบสภาวะคงที่ กล่าวคือ ทิศทางการไหลของน้ำบริเวณเทือกเขาในพื้นที่เป็นพื้นที่รับน้ำ และไหลลงสู่ล่งกลางแอ่งซึ่งเป็นพื้นที่เติมน้ำ

สมดุลของน้ำเฉลี่ยรายปีที่ได้จากแบบจำลองของชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขาที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในช่วงเวลา 3 ปี แสดงใน **รูปที่ 4.6** จากข้อมูลสมดุลน้ำพบว่า น้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองมาจากการไหลออกไปนอกระบบโดยผ่านทาง การระบายน้ำ (ลำธาร) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนน้ำที่ไหลเข้าสู่แบบจำลองมาจากการกักเก็บ ขอบเขตระดับน้ำคงที่ เติมน้ำจากน้ำฝน และจากชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส (**ตารางที่ 4.1**)



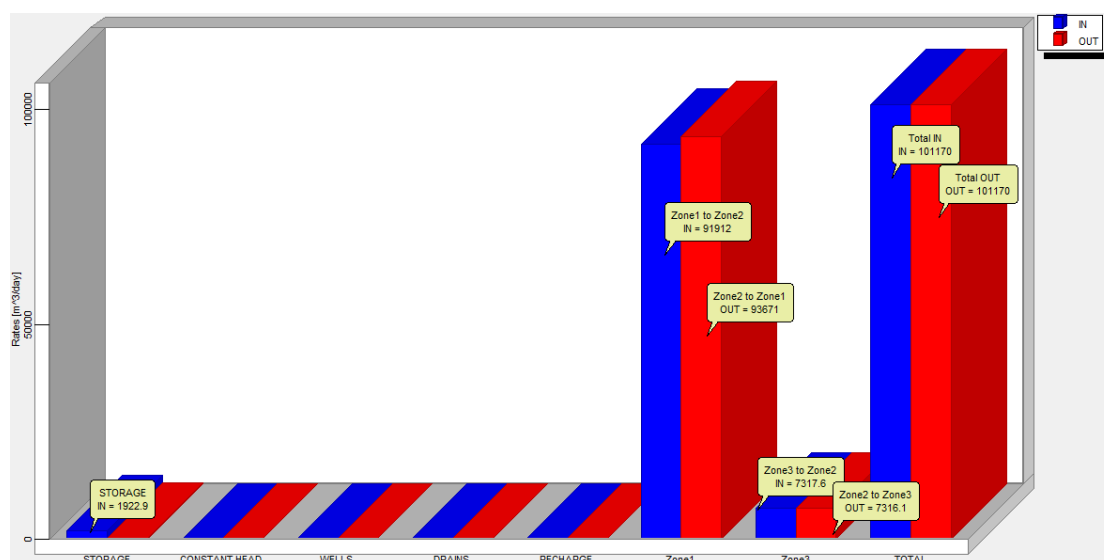
**รูปที่ 4.6** กราฟสมดุลน้ำจากการจำลองของชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขาที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา (3ปี) ในหน่วย ลบ.ม.ต่อวัน

**ตารางที่ 4.1** สมดุลน้ำบาดาลจากการจำลองในสภาวะระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลาของชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขา

แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ลบ.ม./วัน)	ปริมาณการไหลออก (ลบ.ม./วัน)
Storage	187,420	17,881
Constant head	71,517	41,960
Drains	0	238,350
Recharge	38,075	0
Zone2	93,671	91,912
Total	390,680	390,680
In – Out = 0 ลบ.ม./วัน		

\* Zone2 = ชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส

สมดุลของน้ำเฉลี่ยรายปีที่ได้จากแบบจำลองของชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัสที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในช่วงเวลา 3 ปี แสดงใน **รูปที่ 4.7** จากข้อมูลสมดุลน้ำพบว่า น้ำที่ไหลออกจากชั้นน้ำนี้มาจากการไหลออกไปชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขาเป็นส่วนใหญ่ ส่วนน้ำที่ไหลเข้าสู่ชั้นน้ำมาจากชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขา ชั้นน้ำหินแกรนิต รวมถึงการกักเก็บ (**ตารางที่ 4.2**)



**รูปที่ 4.7** กราฟสมดุลน้ำจากการจำลองของชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัสที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา (3ปี) ในหน่วย ลบ.ม.ต่อวัน

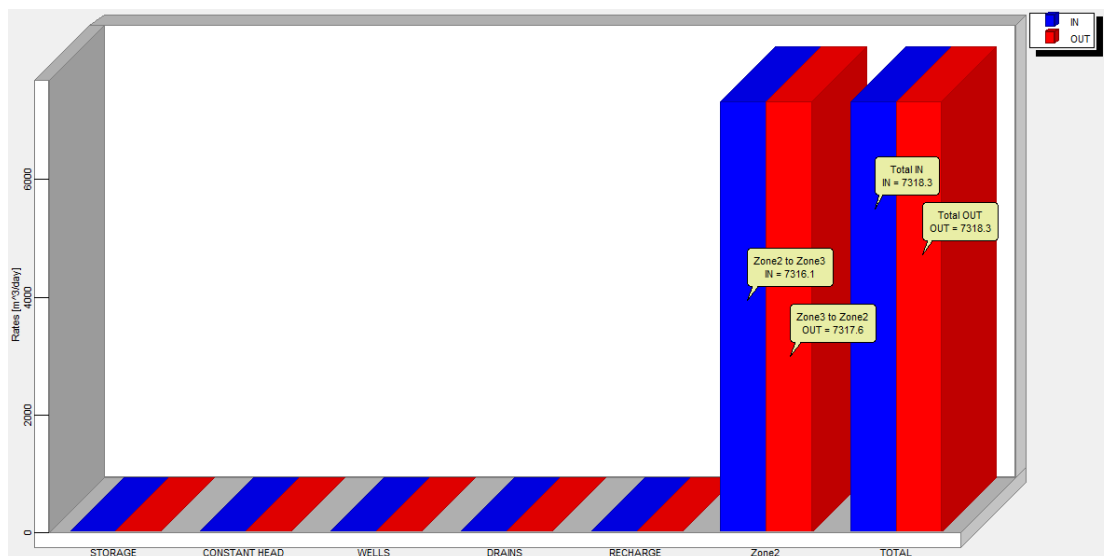
**ตารางที่ 4.2** สมดุลน้ำบาดาลจากการจำลองในสภาวะระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลาของชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส

แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ลบ.ม./วัน)	ปริมาณการไหลออก (ลบ.ม./วัน)
Storage	1,922.9	0
Zone1	91,912	93,671
Zone3	7,317.6	7,316.1
Total	101,170	101,170
In - Out = 0 ลบ.ม./วัน		

\* Zone1 = ชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขา

Zone3 = ชั้นน้ำหินแกรนิต

สมดุลของน้ำเฉลี่ยรายปีที่ได้จากแบบจำลองของชั้นน้ำหินแกรนิตที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในช่วงเวลา 3 ปี แสดงใน รูปที่ 4.8 จากข้อมูลสมดุลน้ำพบว่า น้ำที่ไหลเข้าและไหลออกมาจากชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขา ชั้นน้ำแกรนิต (ตารางที่ 4.3)



รูปที่ 4.8 กราฟสมดุลน้ำจากการจำลองของชั้นน้ำแกรนิตที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา (3ปี) ในหน่วย ลบ.ม.ต่อวัน

ตารางที่ 4.3 สมดุลน้ำบาดาลจากการจำลองในสภาวะระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลาของชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส

แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ลบ.ม./วัน)	ปริมาณการไหลออก (ลบ.ม./วัน)
Zone2	7,316.1	7,317.6
Total	7,318.3	7,318.3
In - Out = 0 ลบ.ม./วัน		

\* Zone2 = ชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัส

จากสมดุลของน้ำเฉลี่ยรายปีที่ได้จากแบบจำลองของแต่ละชั้นน้ำจะเห็นว่า ชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขามีปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณน้ำไหลออกมากที่สุด จึงเป็นชั้นน้ำหลักของแบบจำลอง



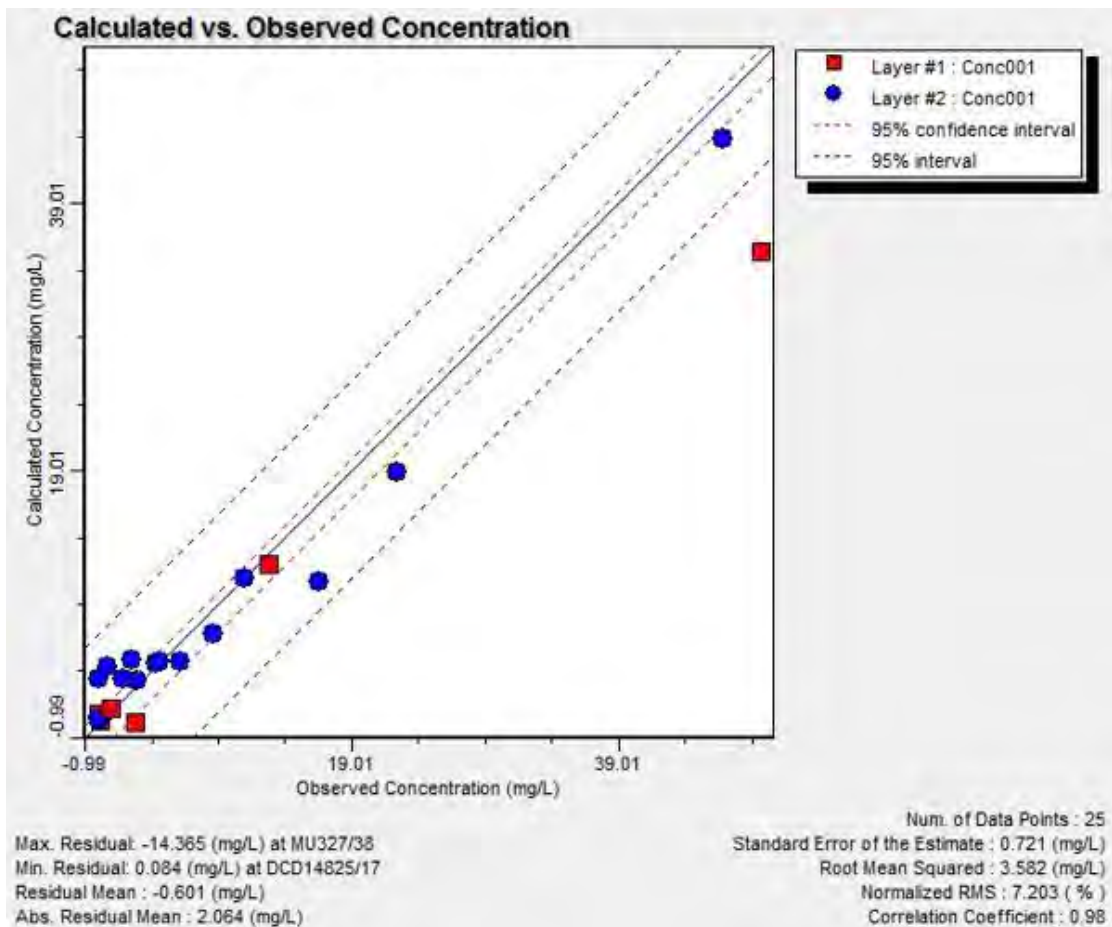
#### 4.3 การจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล

การจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล ได้ใช้แบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล ในสถานะคงที่ที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาประยุกต์ โดยจะใช้ข้อมูล ปริมาณไนเตรทในน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ 25 บ่อ โดยใช้ข้อมูลเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2557 (ฤดูฝน) และเดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 (ฤดูร้อน) จำนวน 2 ชุดข้อมูล และปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของมวลสารของชั้นน้ำ เช่น ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (initial concentration) และความเข้มข้นจากการชะละลาย (recharge concentration) ตามตารางที่ 3.1 เคยกล่าวไปในบทที่ 3

ผลการจำลองการการแพร่กระจายของไนเตรทในเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2557 พบว่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มข้นไนเตรทที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์ และค่าความเข้มข้นไนเตรทที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองดังแสดงใน รูปที่ 4.9 ดังนี้

Standard error of the estimate:	0.721 mg/l
Root mean squared:	3.582 mg/l
Normalized RMS:	7.203 %
Correlation coefficient:	0.98

โดยผลการจำลองส่วนใหญ่อยู่ภายในช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล (เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557)

ผลการจำลองการการแพร่กระจายของไนเตรทในเดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 พบว่า ความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มข้นไนเตรทที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์ และค่าความเข้มข้นไนเตรทที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองดังแสดงใน รูปที่ 4.10 ดังนี้

Standard error of the estimate: 0.086 mg/l

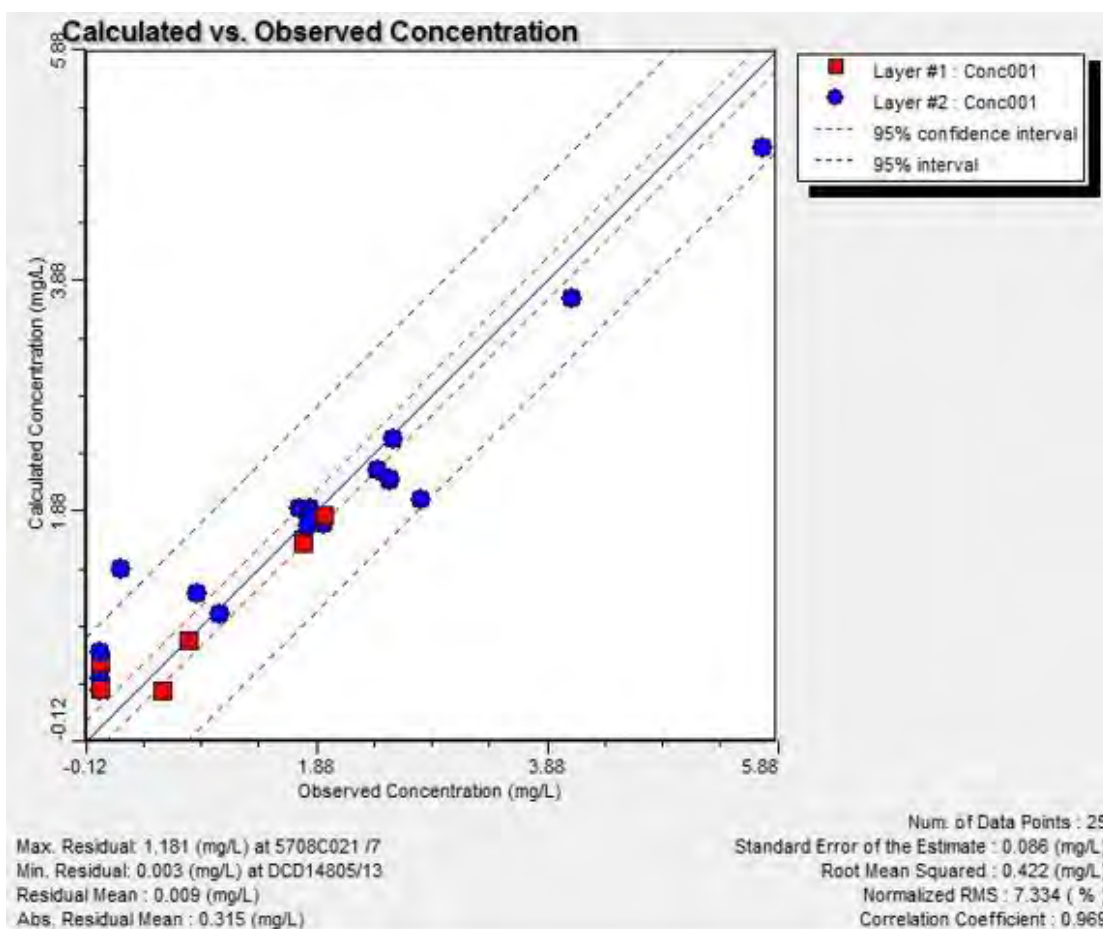
Root mean squared: 0.422 mg/l

Normalized RMS: 7.334 %

Correlation coefficient: 0.969

โดยผลการจำลองส่วนใหญ่อยู่ภายในช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์

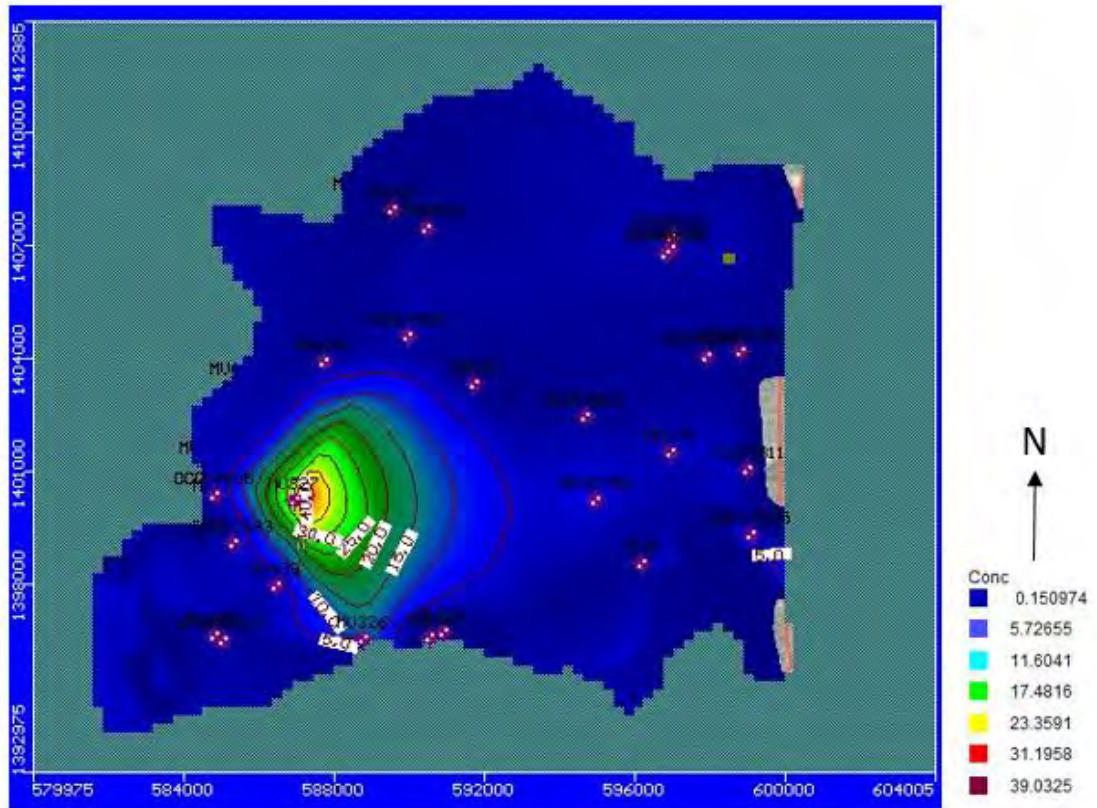




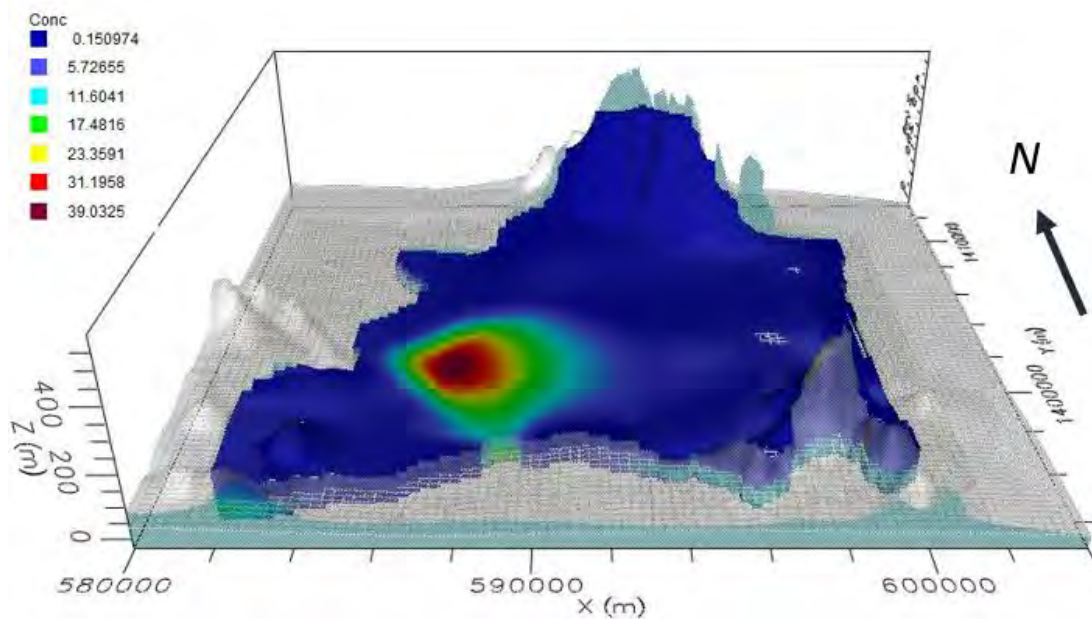
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล (เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558)

ผลการจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาลของทั้ง 2 แบบ พบว่าพื้นที่ที่มีความเสี่ยงจากการแพร่กระจายของไนเตรทคือบริเวณทางด้านทิศตะวันตกของพื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรมหนาแน่นและมีลักษณะเป็นแอ่งน้ำบาดาลดังแสดงใน รูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14)

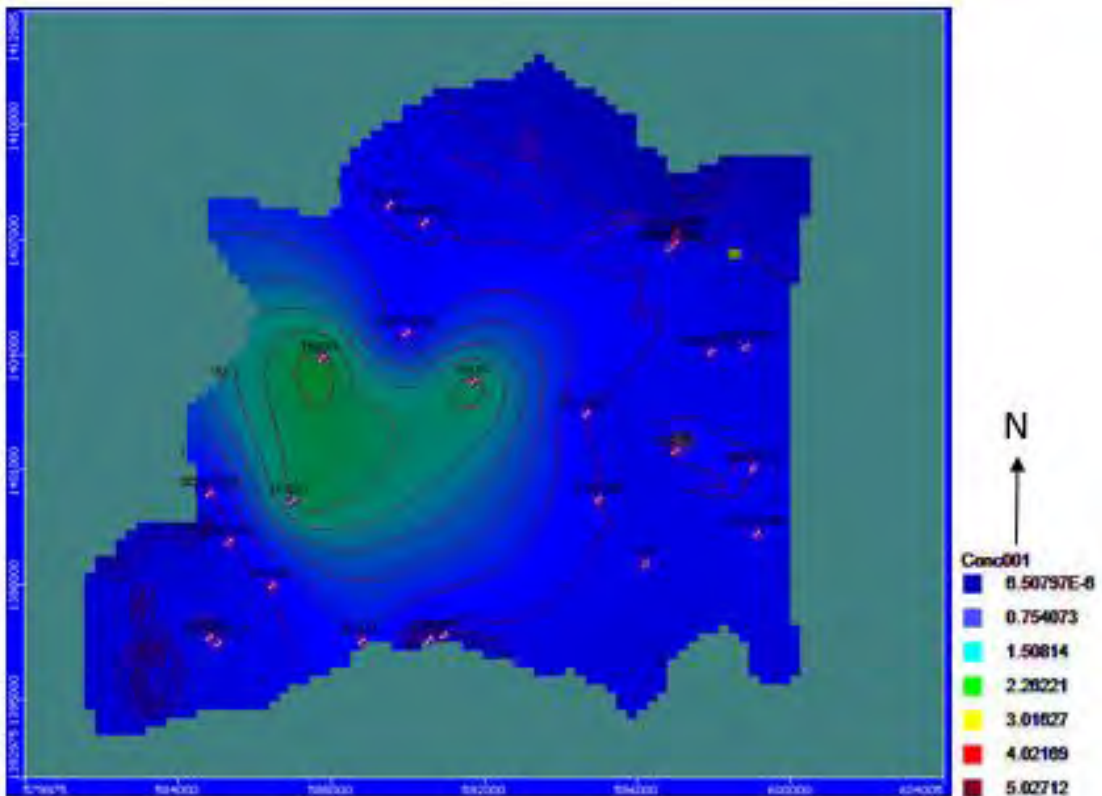
โดยรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำบาดาลตั้งแต่ 0.15 ถึง 39.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำบาดาลตั้งแต่ 6.5E-6 ถึง 5.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถือว่าพบความเข้มข้นไนเตรทน้อยมาก ทั้งนี้ความแตกต่างของช่วงฤดูกาลส่งผลให้พบปริมาณไนเตรทที่ต่างกัน เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงสู่ชั้นน้ำบาดาลต่างกัน



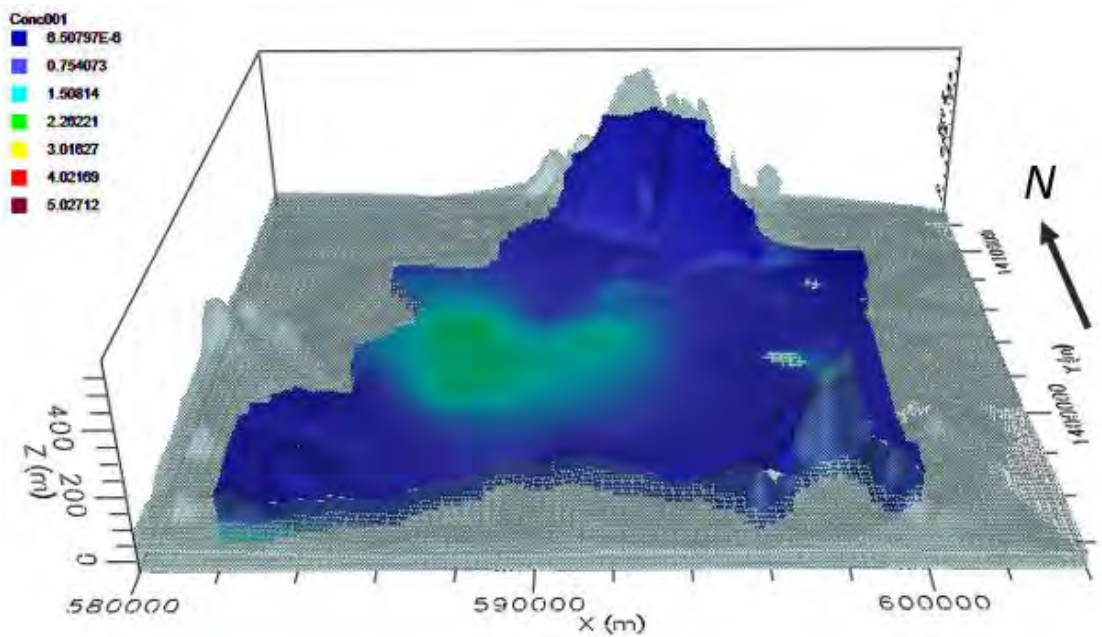
รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำบาดาลจากการคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557)



รูปที่ 4.12 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำบาดาลจากการคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในรูปแบบ 3 มิติ (เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557)



รูปที่ 4.13 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำบาดาลจากการคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558)

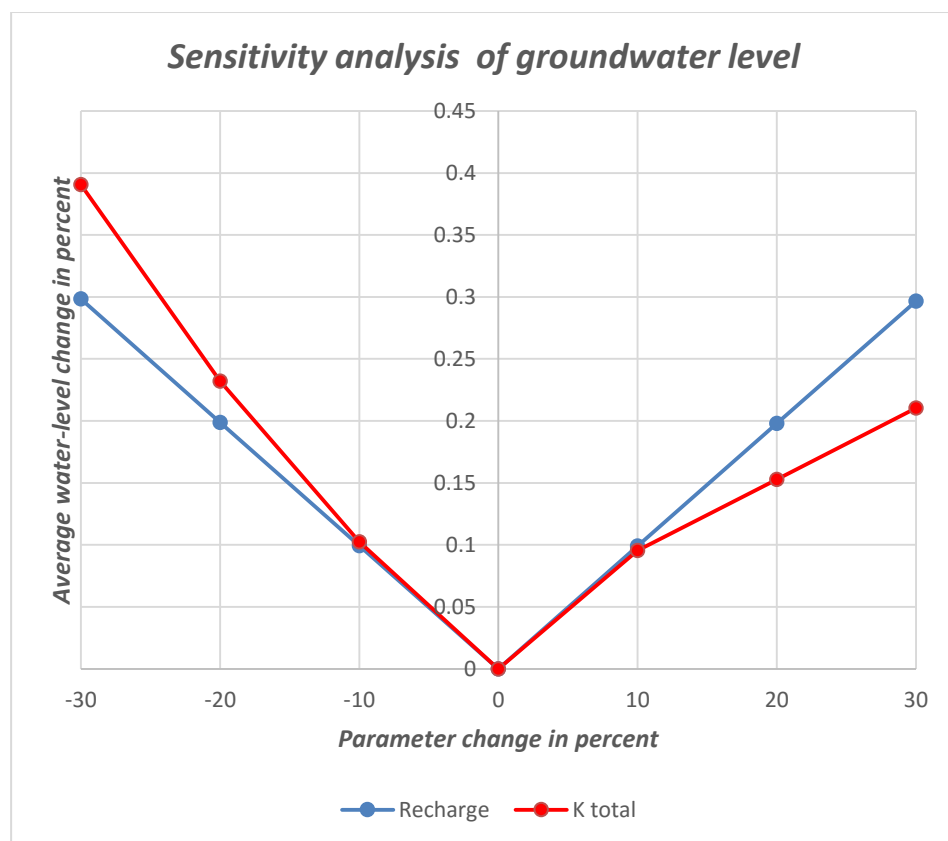


รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำบาดาลจากการคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในรูปแบบ 3 มิติ (เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558)

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองเป็นการวิเคราะห์หาค่า โดยปรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองหลังจากการปรับแก้ค่าแล้ว จากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ละพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นและลดลงร้อยละ 10 20 และ 30

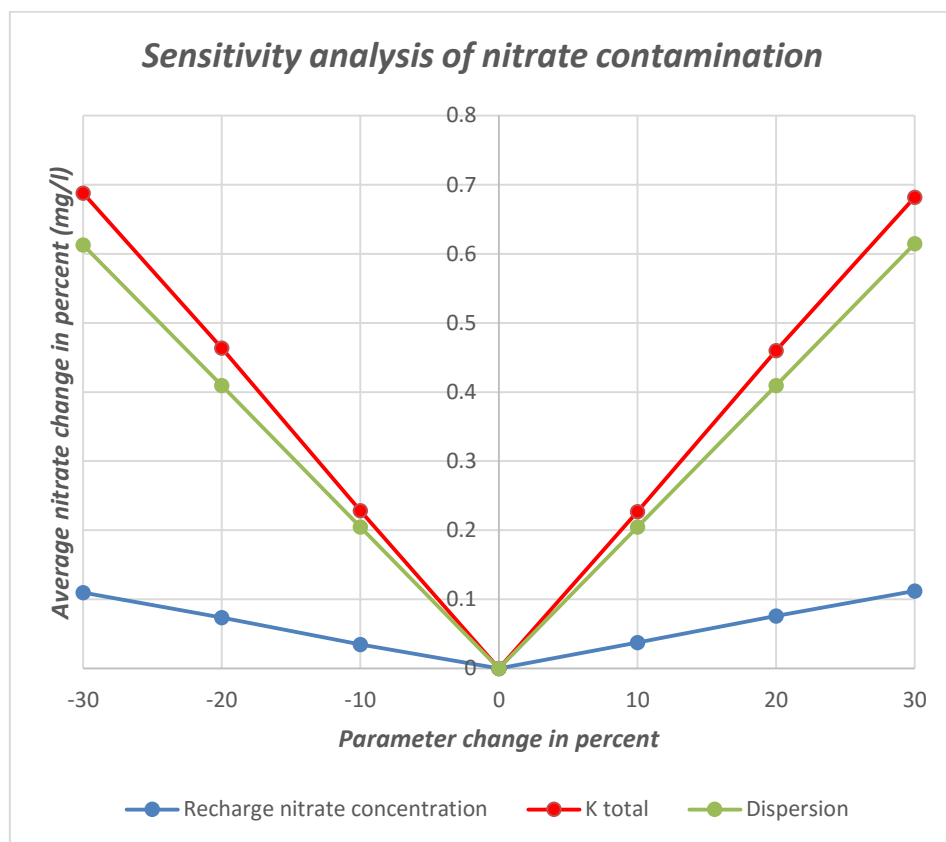
โดยพารามิเตอร์ที่ทำกรวิเคราะห์ความอ่อนไหวในกรณีของการไหลของน้ำบาดาลในน้ำบาดาล คือ อัตราการเติมน้ำ และสภาพการนำชลศาสตร์ โดยเทียบกับค่าเฉลี่ยของระดับน้ำบาดาลที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงใน **รูปที่ 4.15** พบว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอัตราการเติมน้ำจะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของระดับน้ำบาดาลที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุด แต่เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ลดลงสภาพการนำชลศาสตร์จะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของระดับน้ำบาดาลที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุด



**รูปที่ 4.15** กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองในกรณีของการไหลของน้ำบาดาลในน้ำบาดาล



ส่วนพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวในกรณีการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล คือ อัตราการเติมความเข้มข้นของปริมาณไนเตรท สภาพการนำชลศาสตร์ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย โดยเทียบกับค่าเฉลี่ยของปริมาณไนเตรทที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงใน **รูปที่ 4.16** พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแบบจำลองมากที่สุด คือ สภาพการนำชลศาสตร์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย และอัตราการเติมความเข้มข้นของปริมาณไนเตรท ตามลำดับ



**รูปที่ 4.16** กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองในกรณีการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล

## บทที่ 5

### อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

#### 5.1 อภิปรายผลการศึกษา

การศึกษาการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาลบริเวณพื้นที่ศูนย์การศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในครั้งนี้ประกอบด้วยการจัดเตรียมข้อมูลพื้นที่ศึกษาสำหรับใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ ข้อมูลลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลการใช้น้ำบาดาล รวมถึงระดับน้ำบาดาล และปริมาณไนเตรทที่พบจากบ่อสังเกตการณ์ เป็นต้น นอกจากนี้ได้ทำการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขให้กับแบบจำลอง เช่น สภาพการนำชลศาสตร์ ขอบเขตระดับน้ำคงที่ ขอบเขตของระดับน้ำทั่วไป (General head) และอัตราการเติมน้ำ เป็นต้น เพื่อใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง โดยแบ่งการจำลองเป็น 2 กรณีหลักๆ กล่าวคือ

- 1) กรณีจำลองการไหลของน้ำบาดาล
  - 1.1 กรณีสถานะคงที่
  - 1.2 กรณีสถานะการไหลของน้ำบาดาลที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา
2. กรณีจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล

บาดาลมีการไหลสอดคล้องกับการไหลในแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ กล่าวคือทิศทางการไหลของน้ำบาดาลไหลจากพื้นที่เติมน้ำที่มีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูง ลงสู่ที่ราบลุ่มบริเวณตรงกลางของพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.66 เมตร และมีค่าปรกติของค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อน ร้อยละ 10.51 โดยใช้ข้อมูลระดับน้ำงานวิจัยของวิวิวรรณ โรจน์บวรวิทยา (2554) และมีค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 9.49 เมตร และมีค่าปรกติของค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อน ร้อยละ 16.17 เมื่อใช้ข้อมูลระดับน้ำจากงานวิจัยของวิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์ (2557) โดยผลการจำลองส่วนใหญ่อยู่ภายในเส้นช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบค่าระดับน้ำที่ได้จากบ่อสังเกตการณ์กับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ

สำหรับการจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าระดับน้ำในเดือน มกราคม พ.ศ. 2556 มีค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5.88 เมตร และมีค่าปรกติของค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อน ร้อยละ 10.02 และระดับน้ำในเดือน มกราคม พ.ศ. 2557 มีค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 7.24 เมตร และมีค่าปรกติของค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อน ร้อยละ 12.34 โดยผลการจำลองส่วนใหญ่อยู่ภายในเส้นช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบค่าระดับน้ำที่ได้จากบ่อสังเกตการณ์กับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ โดยน้ำที่ไหลเข้าระบบส่วนใหญ่เป็นการกักเก็บน้ำในชั้นหินให้น้ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ทำให้สามารถกักเก็บน้ำได้มาก ส่วนน้ำที่ไหลออกจากระบบส่วนใหญ่เกิดจากการระบายจากลำธารธรรมชาติในพื้นที่ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะภูมิประเทศที่พบทางลำน้ำธรรมชาติหลายตำแหน่งในพื้นที่

โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้หลังจากการปรับเทียบ พบว่าค่าสภาพการนำชลศาสตร์ มีค่าอยู่ในช่วง  $4.81 \times 10^{-6} - 2.75 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที (หรือ 0.42 – 23.76 เมตรต่อวัน) ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของวิวิวรรณ โรจน์บวรวิทยา (2554) ที่ทำการคำนวณของสภาพการนำชลศาสตร์ที่ได้จากการสุบทดสอบ พบว่าค่าสภาพการนำชลศาสตร์ อยู่ในช่วง  $3.15 \times 10^{-6} - 4.56 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที (หรือ 0.27 – 39.40 เมตรต่อวัน) สำหรับค่าการกักเก็บจำเพาะ ค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ และค่าความพรุนประสิทธิผล มีค่าอยู่ในช่วง  $3.05 \times 10^{-7} - 0.0001 \text{ m}^{-1}$ , 0.0009 – 0.14 และ 0.005 – 0.15 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับ Domenico and Miffilin (1965), Heath (1983) และ Morris and Johnson (1967) ตามตารางที่ 2.2, 2.3 และ 2.4

เมื่อพิจารณาจากสมดุลของน้ำเฉลี่ยรายปีที่ได้จากแบบจำลองของแต่ละชั้นน้ำ พบว่าชั้นน้ำที่ราบลุ่มน้ำหลากและตะกอนเศษหินเชิงเขามีปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณน้ำไหลออกมากที่สุด จึงเป็นชั้นน้ำหลักของแบบจำลอง โดยมีปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณน้ำไหลออกเท่ากับ 390,680 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ชั้นน้ำหินตะกอนกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิฟอรัสซึ่งเป็นชั้นน้ำรอง มีปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณน้ำไหลออกเท่ากับ 101,170 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่วนชั้นน้ำหินแกรนิต มีปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณน้ำไหลออกเท่ากับ 7,318.3 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

การจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาล ที่ได้จากการเพิ่มค่าพารามิเตอร์จากกรณีการจำลองการไหลของน้ำบาดาล ได้แก่ อัตราการเติมความเข้มข้นของปริมาณไนเตรท (มิลลิกรัม

ต่อลิตร) และค่าการแพร่กระจายในแนวตั้งมีค่าประมาณ 10% ของการแพร่กระจายในแนวราบ พบว่าค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนของปริมาณไนเตรทและค่าปรกติของค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 ตัวแทนของฤดูฝนมีค่า 3.582 มิลลิกรัมต่อลิตร และร้อยละ 7.203 ตามลำดับ ส่วนในเดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 ตัวแทนฤดูร้อน มีค่า 0.422 มิลลิกรัมต่อลิตร และร้อยละ 7.334 โดยทั้งสองช่วงเวลาอยู่ในเส้นช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบปริมาณไนเตรทที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์กับค่าปริมาณไนเตรทที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ โดยพื้นที่ที่มีความเสี่ยงจากการแพร่กระจายของไนเตรทคือบริเวณทางด้านทิศตะวันตกของพื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรมหนาแน่นและมีลักษณะเป็นแอ่งน้ำบาดาล

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง ในกรณีการไหลของน้ำบาดาล โดยเทียบกับค่าเฉลี่ยของระดับน้ำบาดาลที่เปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอัตราการเติมน้ำจะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของระดับน้ำบาดาลที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุด แต่เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ลดลงสภาพการนำชลศาสตร์จะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของระดับน้ำบาดาลที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุด สำหรับกรณีการแพร่กระจายของไนเตรท โดยเทียบกับค่าเฉลี่ยของปริมาณไนเตรทที่เปลี่ยนแปลง พบว่าพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองมากที่สุดคือ สภาพการนำชลศาสตร์ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของชั้นน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกลางรูพรุน จากกราฟจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณไนเตรทที่เปลี่ยนแปลงจะสูงมากในกรณีที่มีการเพิ่มและลดค่าสภาพการนำชลศาสตร์ร้อยละ 30 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวกลางรูพรุนส่งผลให้ไนเตรทมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

## 5.2 สรุปผลการศึกษา

จากการจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่แสดงถึงทิศทางการไหลที่ได้จากกรณีการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะคงที่และกรณีการไหลของน้ำบาดาลที่สภาวะระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่า น้ำมีทิศทางการไหลจากพื้นที่เติมน้ำที่มีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูง ลงสู่ที่ราบลุ่มบริเวณตรงกลางของพื้นที่ศึกษา โดยน้ำที่ไหลเข้าระบบส่วนใหญ่มาจากการกักเก็บน้ำในชั้นน้ำ 189,340 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จากการปริมาณเติมน้ำทั้งหมด 298,960 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และน้ำที่ไหลออกจากระบบส่วนใหญ่คือการระบายน้ำ (ลำธาร) 238,350 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และปริมาณน้ำที่ไหล



ออกจากการเก็บกัก 60,610 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน รวมปริมาณน้ำที่ไหลออกทั้งหมด 298,960 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

จากการจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทพบว่า ในช่วงฤดูฝนจะพบค่าไนเตรทสูงกว่าฤดูร้อน ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของน้ำฝนที่ลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ทำให้มีการแพร่กระจายของไนเตรทมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจุดที่มีการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาลทั้งช่วงฤดูฝนและฤดูร้อนพบว่าเป็นบริเวณทางด้านทิศตะวันตกของพื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรมหนาแน่น โดยไนเตรทที่พบในพื้นที่มาจากการใช้ปุ๋ยเรียในการเพาะปลูกพืช เช่น อ้อยและสับปะรด และเมื่อเปรียบเทียบกับทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินจากการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าพื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะเป็นแอ่งน้ำบาดาล ทำให้ไนเตรทมีลักษณะการสะสมตัวบริเวณพื้นที่รับน้ำ

ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองพบว่า พารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวต่อการปรับแก้มากที่สุดได้แก่ สภาพการนำชลศาสตร์ โดยชั้นน้ำที่มีศักยภาพที่สุด คือ ชั้นน้ำประเททตะกอนที่รับน้ำท่วมถึง เนื่องจากมีค่าสภาพการนำชลศาสตร์ สูง ประมาณ 23.76 m/d ซึ่งผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiang และ Somers (2008) ที่ทำการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายของไนเตรทในน้ำบาดาลบริเวณเกาะพรินซ์เอ็ดเวิร์ด ประเทศแคนาดา กล่าวคือ สภาพการนำชลศาสตร์ส่งผลต่อการปรับแก้มากที่สุด

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

การศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ถือได้ว่าประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ในเรื่องของการจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของไนเตรทบริเวณพื้นที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม ข้อมูลดังกล่าวการเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสามารถทำได้โดยการทำการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมทั้งในด้านปริมาณและความละเอียด ดังข้อเสนอแนะต่อไปนี้

1. ควรเก็บข้อมูลระดับน้ำและเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท อย่างมีระบบและต่อเนื่องให้ถึงปัจจุบัน เพื่อนำข้อมูลมาปรับปรุงแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น
2. ควรเพิ่มจำนวนบ่อสังเกตการณ์ให้กระจายครอบคลุมพื้นที่ศึกษาเพื่อเพิ่มความละเอียดของข้อมูล

3. ควรมีการนำแบบจำลองนี้ไปทำการตรวจสอบอีกครั้งหนึ่ง ด้วยข้อมูลชุดใหม่ เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น
4. หากในอนาคตมีการศึกษาสภาพการนำชลศาสตร์เพิ่มเติมควรนำมาพิจารณาปรับปรุงความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองมากที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. 2551. การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยา และทรัพยากรธรณี จังหวัดเพชรบุรี. กรุงเทพฯ
- กองน้ำบาดาล. 2552. ฐานข้อมูลพสุธารา [ข้อมูลดิจิทัล]: กองน้ำบาดาลกรมทรัพยากรธรณี.
- เทวนพฤทธิ์ ภาคไชย. 2558. ปัจจัยและกระบวนการปนเปื้อนไนเตรทในชั้นน้ำบาดาลบริเวณศูนย์การศึกษาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง จังหวัดเพชรบุรี. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เมธี โอภาสเสถียร. 2555. ผลกระทบของการปนเปื้อนของน้ำชะขยะของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนของอาร์เซนิก. ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) ภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิวิวรรธน์ โรจน์บวรวิทยา. 2554. ลักษณะทางอุทกธรณีของชั้นน้ำบาดาลบริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจาก พระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์. 2557. การแทรกซอนของน้ำทะเลในชั้นน้ำบาดาลบริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจาก พระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุภลักษณ์ มุ่งดี. 2555. การประเมินศักยภาพในการเติมน้ำในชั้นน้ำบาดาลโดยใช้เทคนิคระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์บริเวณศูนย์ ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริและบริเวณใกล้เคียง อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992, Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport: Academic Press, Inc., 381 p.
- Dario, S., Marco, O., Marina, D.M. and Carlo, G., 2007. Groundwater nitrate contamination risk assessment: A comparison of parametric systems and

simulation modelling. American Journal of Environmental Sciences 3 (3): 117-125.

Jiang, Y. and Somers, G., 2008. Modeling effects of nitrate from non-point sources on groundwater quality in an agricultural watershed in Prince Edward Island, Canada. Hydrogeology Journal DOI 10.1007/s10040-008-0390-2.

Eltarabily M. G., Negam A.M., Yoshimura C., Saavedra O.C. Modeling the impact of nitrate fertilizers on groundwater quality in the southern part of the Nile Delta, Egypt. IWA Publishing. DOI: 10.2166/ws.2016.162.

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 ข้อมูล pumping wells (เพิ่มเติม)

เลขบ่อ	Easting	Northing	Top screen (m)	Bottom screen (m)	Q (m <sup>3</sup> /day)	ระดับน้ำลด (m)	Aquifer	ปีที่ก่อสร้าง
C437	586846	1403744	27.5006	21.5006	-5	0.39	Qfd	2523
C438	592307	1406465	74.0023	68.0023	-5	17.33	Qfd	2523
C474	589722	1399543	9.4578	3.4578	-5	1.22	Qfd	2525
C694	587689	1401865	8.9289	2.9289	-30	0.38	Qfd	2530
MU100	589375	1402213	22.1552	16.1552	-3	0.6	Qfd	2534
MU114	588653	1397423	12.0050	6.0050	-40	0.3	Qfd	2534
MU117	585094	1396296	22.2571	16.2571	-0.04	1.5	Qfd	2534
MU128	591439	1396959	35.3538	29.3538	-40	0.3	Qfd	2534
MU257	591873	1403387	28.7775	22.7775	-35	14.1	Qfd	2536
MU262	589957	1404549	19.1009	13.1009	-2	33	Pcms	2536
MU279	587473	1404330	8.8241	2.8241	-30	9	Qfd	2537
MU284	589460	1401991	16.4876	10.4876	-10	0.3	Qfd	2537
MU314	587413	1399710	13.6387	7.6387	-5	0.51	Qfd	2537
MU315	589738	1400174	14.2940	8.2940	-5	0.44	Qfd	2537

MU316	587040	1401465	17.9303	11.9303	-5	0.5	Qfd	2537
MU317	587657	1401144	22.1327	16.1327	-5	1.47	Qfd	2537
MU319	584914	1400139	18.1274	12.1274	-0.5	35.3	Qfd	2537
MU321	589347	1399153	23.0697	17.0697	-2	0.52	Qfd	2537
MU325	587398	1396671	-0.2347	-6.2347	-40	0.98	Qfd	2537
MU328	588628	1399743	8.9377	2.9377	-40	0.3	Qfd	2537
MU337	588212	1400495	15.0047	9.0047	-40	2.95	Qfd	2537
MU338	584591	1401146	17.4805	14.4805	-25	3.35	Pcms	2537
MU339	592055	1396549	48.4641	45.4641	-40	0	Qfd	2537
MU347	593673	1403653	28.2886	22.2886	-10	16.24	Qfd	2537
MU379	594139	1397380	17.9954	11.9954	-4	24	Pcms	2538
MU387	588594	1400413	18.5132	12.5132	-4	0	Qfd	2538
MU393	586829	1399769	21.3030	15.3030	-4	31.49	Qfd	2538
MU394	585682	1402670	31.7165	25.7165	-10	10.22	Qfd	2538
MU434	590075	1399074	10.9628	4.9628	-50	3	Qfd	2539
MU438	588681	1408152	43.7950	37.7950	-35	12	Pcms	2539
MU464	590707	1406090	22.9876	16.9876	-4	9	Pcms	2539
MU53	591539	1403291	28.5062	22.5062	-10	10.5	Qfd	2533

MU576	589764	1398926	14.5094	10.5094	-3	12	Qfd	2541
MU623	587025	1402745	32.1593	26.1593	-3	6	Qfd	2542
MU662	589218	1399417	10.8197	1.8197	-3	2	Qfd	2543
MU663	587703	1400454	23.9996	5.9996	-3	2	Qfd	2543
MU82	585282	1403253	-6.2906	-12.2906	-4	48	Pcms	2534
MU96	587156	1402703	25.8723	19.8723	-40	0.44	Qfd	2534
MU97	588545	1403302	26.3833	20.3833	-25	9	Qfd	2534
MU99	588013	1401739	26.4624	20.4624	-1	0.08	Qfd	2534



