



การจำลองการไหลของน้ำบาดาลของเทศบาลนครสงขลา
โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
Groundwater Modeling of Songkhla Municipal Area

สุพล สันติเจริญกมล
Supol Santicharaenkamol

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University**

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การจำลองการไหลของน้ำบาดาลของเทศบาลนครสงขลาโดยใช้
 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
ผู้เขียน นายสุพล สันติเจริญกมล
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เกลิมยานนท์)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เกลิมยานนท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
โยธา

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์คารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การจำลองการไหลของน้ำบาดาลของเทศบาลนครสงขลาโดยใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
ผู้เขียน	นายสุพล สันติเจริญกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

เทศบาลนครสงขลามีลักษณะเป็นแหลมที่ยื่นออกไปในทะเล เป็นพื้นที่ที่เกิดจากการสะสมตัวของตะกอนยุคควอเทอร์นารี น้ำบาดาลส่วนใหญ่ได้จากชั้นตะกอนหินร่วน โดยมีการใช้น้ำจากชั้นน้ำที่ไม่มีแรงดันมากที่สุด เมื่อมีการสูบน้ำบาดาลจากเทศบาลนครสงขลามาใช้มากขึ้น อาจทำให้เสียสมดุลของน้ำ และอาจส่งผลให้เกิดการรुकูล้ำของน้ำเค็มจากอ่าวไทยและทะเลสาบสงขลาสู่ชั้นน้ำบริเวณเทศบาลนครสงขลาได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาระบบการไหลสมดุลน้ำบาดาล และขอบเขตการแพร่กระจายของคลอไรด์ในสถานะการสูบน้ำใช้ในปัจุบัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกใช้ในการประมาณปริมาณการสูบน้ำปลอดภัยและทำนายการรुकูล้ำของน้ำเค็มสู่ชั้นน้ำบาดาลในกรณีที่มีการสูบน้ำเพิ่มขึ้นในอนาคต การปรับค่าและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำได้โดยใช้ระดับน้ำและคุณภาพน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ 8 บ่อ

ผลการศึกษาพบว่าชั้นน้ำบาดาลในเขตเทศบาลนครสงขลาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชั้น ให้ชื่อว่า ชั้นน้ำสมิหลา ชั้นน้ำบ่อยาง และชั้นน้ำสงขลา ตามลำดับ ผลการจำลองการไหลของน้ำบาดาลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าการไหลของน้ำบาดาลมีทิศการไหลจากพื้นที่เดิมน้ำที่ศได้ไปยังตอนกลางของพื้นที่ แล้วไหลออกสู่อ่าวไทยทางทิศตะวันออกและทะเลสาบสงขลาทางทิศตะวันตก ผลการศึกษาสมดุลน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2552 พบว่า ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่แบบจำลองมาจากการเพิ่มเติมน้ำสุทธิจากน้ำฝน 1,149,460 ลูกบาศก์เมตรต่อปี จากปริมาณน้ำที่กักเก็บอยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำ 841,795 ลูกบาศก์เมตรต่อปี จากการเติมน้ำจากพื้นที่เดิมน้ำทางทิศได้ 44,270 ลูกบาศก์เมตรต่อปี และจากทะเลสาบสงขลาและอ่าวไทย 1,534 ลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณน้ำไหลเข้าระบบทั้งหมด 2,037,070 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนปริมาณน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองไหลออกไปกักเก็บในชั้นหินอุ้มน้ำ 850,279 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ไหลออกสู่ทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย 842,696 ลูกบาศก์เมตรต่อปี สูบออกจากบ่อบาดาล 335,070 ลูกบาศก์เมตรต่อปี และไหลออกทางทิศได้ของพื้นที่ 10,030 ลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณน้ำไหลออกจากแบบจำลองทั้งหมด 2,038,080 ลูกบาศก์เมตรต่อปี

ผลจากการจำลองการรुकกล้าของน้ำเค็มพบว่า ในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบันชั้นน้ำ
สมิหลามีปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี บริเวณที่มีการกระจายตัวของคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐาน
เกิดขึ้นในพื้นที่ใกล้อ่าวไทย และบริเวณริมทะเลสาบสงขลาของชั้นน้ำบ่ออย่าง ได้แก่ บริเวณ
อนุสาวรีย์กรมหลวงชุมพร แหลมสนอ่อน หาดสมิหลา หาดชลาทัศน์ และศาลเจ้าพ่อหลักเมือง
เป็นต้น มีขอบเขตความเค็มคิดเป็นระยะทาง จากริมทะเลสาบสงขลาเข้าสู่ตัวเมืองประมาณ
300 เมตร และจากริมทะเลอ่าวไทยเข้าสู่ตัวเมืองประมาณ 250 เมตร

ผลการจำลองเพื่อประเมินปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อแหล่ง
น้ำบาดาล (Safe yield) พบว่า ในสภาพการใช้น้ำปัจจุบันหากมีอัตราการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% และ
10% จะส่งผลให้ระดับน้ำลดลงมากกว่า 2 เมตร ภายใน 14 ปี และ 9 ปี ตามลำดับ ส่วนการรุกกล้าของ
น้ำเค็มพบว่า เมื่อมีการใช้น้ำเพิ่มขึ้น 10% ต่อปี พบว่า สำหรับชั้นน้ำบ่ออย่างแนวของคลอไรด์ที่มี
ปริมาณมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวเมืองเทศบาลนครสงขลาเป็นระยะทาง
ประมาณ 75 เมตรในเวลา 10 ปี ดังนั้นจึงกำหนดปริมาณใช้น้ำปลอดภัยของ เทศบาลนครสงขลาไม่
เกิน 660,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือประมาณ 1,810 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

คำหลัก : เทศบาลนครสงขลา, การรุกกล้าของน้ำเค็ม, สมดุลน้ำใต้ดิน, ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย

Thesis Title	Groundwater Modeling of Songkhla Municipal Area
Author	Mr. Supol Santicharaenkamol
Major Program	Civil Engineering
Academic Year	2010

ABSTRACT

A cape shape area of Songkhla municipality is filled with quaternary deposits which contains sources of groundwater. Groundwater is mainly withdrawn from an unconfined aquifer. Recent increase in groundwater withdrawal may jeopardize the groundwater balance resulting in seawater intrusion from the Gulf of Thailand and Songkhla Lake into Songkhla municipal area. The objectives of this study were to study the groundwater flow, the boundary of chloride contaminated areas and the water balance as a result from present groundwater pumpage. A 3-dimensional numerical groundwater model was developed to estimate groundwater safe yield and to predict the possible seawater intrusion due to projected groundwater pumpage. The model was calibrated and verified using groundwater head and chloride concentration data measured from eight monitoring wells.

Study results showed that there are three main unconsolidated aquifers namely; Samila aquifer, Boryang aquifer, and Songkhla aquifer. Transient simulation results showed that the direction of groundwater flow was from the recharge areas in the south to the center of the study area to the Gulf of Thailand in the east and to the Songkhla Lake in the west. For 2009, groundwater balance calculation results revealed that inflows from rainfall, storage, specified flux, and the Songkhla Lake and Gulf of Thailand were 1,149,460, 841,795, 44,270, and 1.534 m³/yr, respectively. The model outflows to storage, the Songkhla Lake and Gulf of Thailand, pumping wells, and specified flux were 850,279, 842,696, 335,070, and 10,030 m³/yr, respectively. Total inflows and outflows were 2,037,070 and 2,038,080 m³/yr, respectively.

For Samila aquifer, seawater intrusion simulation results indicated that, for current pumpage, the chloride concentration was within groundwater standard. For Boryang aquifer, the areas that were affected by higher-than-standard chloride concentration were: Prince chumphon monument, Son On cape, Samila beach, Chalathat beach, and City pillar shrine.

The seawater affected areas approximately covered the distance of 300 meters inland from the Songkhla Lake and 250 meters inland from the Gulf of Thailand.

To assess the groundwater safe yield, simulation results showed that if the rate of groundwater pumpage increased annually by 5% and 10%, the water level would drop more than 2 meters within 14 and 9 years, respectively. Seawater intrusion simulation results indicated that, for Boryang aquifer, and annual increase pumpage of 10%, the 600-ppm-chloride front would move 75 meters inland from current location within 10 years. Thus, the evaluated groundwater safe yield for Songkhla municipality was 660,000 m³/yr or 1,810 m³/day.

Keywords : Songkhla municipal area, Seawater intrusion, Groundwater balance, Safe yield

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(14)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 การทบทวนเอกสาร	
2.1 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา	5
2.1.1 ที่ตั้งและอาณาเขตของเทศบาลนครสงขลา	5
2.1.2 สภาพภูมิอากาศ	7
2.1.3 การใช้ประโยชน์ที่ดิน	7
2.1.4 ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา	8
2.1.5 ลักษณะทางธรณีวิทยา	12
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับน้ำบาดาลและสารปนเปื้อน	12
2.2.1 การไหลของน้ำบาดาล	12
2.2.2 ชั้นหินอุ้มน้ำ	16
2.2.3 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำ	18
2.2.4 หลักการรุกของน้ำเค็ม	21
2.2.5 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน	23
2.2.6 การประเมินศักยภาพแอ่งน้ำบาดาล	24
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	26
2.3.1 โปรแกรม Visual MODFLOW (v.4.1 pro)	27
2.3.2 โปรแกรม SEAWAT	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ใน Visual MODFLOW	29
2.3.4 Variable Density Equation	31
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
3 งานรวบรวมข้อมูลทุกัญมิ	
3.1 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา	39
3.2 การประเมินอัตราการเพิ่มเติมน้ำ (Recharge)	42
3.3 การประเมินอัตราการใช้น้ำบาดาล	49
4 งานทดสอบและเก็บข้อมูลภาคสนาม	
4.1 การสำรวจค่าพิกัดและค่าระดับบ่อบาดาล	50
4.2 การติดตามวัดระดับน้ำและตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาล	52
5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	
5.1 กำหนดวัตถุประสงค์ (Define Purpose)	63
5.2 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model)	63
5.3 เลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Program Selection)	65
5.4 การสร้างแบบจำลอง (Model Design)	65
5.4.1 การออกแบบกริด (Grid Design)	67
5.4.2 การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง (Boundary Condition)	69
5.4.3 สภาพขอบเขตและช่วงเวลาการคำนวณ (Time Step and Stress Period)	69
5.5 การจำลองการไหลในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient State Flow)	70
5.5.1 อัตราการเติมน้ำ (Recharge Rate)	70
5.5.2 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ (Flow Property)	70
5.5.3 ระดับแรงดันน้ำเริ่มต้น (Initial Head)	70
5.5.4 การใช้น้ำบาดาล (Groundwater Usage)	72
5.6 การจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม (Mass Transport Modeling)	73
5.6.1 ความเข้มข้นคลอไรด์เริ่มต้น (Initial Chloride Concentration)	73
5.6.2 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำ (Dispersivity)	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.7 การปรับเทียบและตรวจสอบยืนยันแบบจำลอง (Model Calibration and Verification)	74
5.7.1 การไหลในสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	74
5.7.2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม	76
5.8 ผลการจำลอง	78
5.8.1 การไหลในสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	78
5.8.2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม	79
5.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Sensitivity Analysis)	83
5.10 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล (Groundwater Potential Assessment)	84
5.10.1 กรณีที่ 1 การใช้น้ำคงที่ในช่วงเวลา 10 ปี	85
5.10.2 กรณีที่ 2 การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วงเวลา 10 ปี	89
5.10.3 กรณีที่ 3 การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ในช่วงเวลา 10 ปี	94
5.11 เขตน้ำบาดาลย่อย (Zone Budget)	98
5.12 ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย (Safe Yield)	101
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุป	104
6.1.1 สภาพอุทกธรณีวิทยาของเทศบาลนครสงขลา	104
6.1.2 การไหลและสมดุลของน้ำใต้ดิน	105
6.1.3 การรุกรานของน้ำเค็ม	106
6.1.4 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล	106
6.2 ข้อเสนอแนะ	107
บรรณานุกรม	109
ภาคผนวก	
ก บ่อที่ใช้ในการศึกษา	114
ข ข้อมูลน้ำฝน – การคายระเหย	116
ค ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลและระดับน้ำบาดาล	119
ง ข้อมูลการใช้น้ำประปาและจำนวนประชากร	122

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
จ ที่มาและรายละเอียดสมการการไหลและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน	123
ฉ การคำนวณหาปริมาณการเติมน้ำ	141
การเผยแพร่วิทยานิพนธ์	
การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ ก	145
การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ ข	151
ประวัติผู้เขียน	158

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงค่าการกักเก็บจำเพาะของชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน	17
2.2 ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน	18
2.3 ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของหินอุ้มน้ำ	19
3.1 รายละเอียดการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ	38
3.2 ตำแหน่งบ่อบาดาลที่ใช้ในการศึกษา	41
3.3 รายละเอียดของแนวตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา (Cross Section)	41
3.4 คุณสมบัติของชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา	42
3.5 ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530-2550	47
3.6 ปริมาณการคายระเหยเฉลี่ยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524-2544	47
3.7 ผลการคำนวณการเติมน้ำในพื้นที่ศึกษา	48
3.8 การใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา	49
4.1 รายละเอียดค่าพิกัดและระดับบ่อบาดาลด้วยกล้อง GPS System 500	52
4.2 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำสมิหลา (กันยายน 2551 – มิถุนายน 2552)	57
4.3 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำบ่อยาง (กันยายน 2551 – มิถุนายน 2552)	58
5.1 การกำหนดรายละเอียดของแบบจำลอง	68
5.2 รายละเอียดการกำหนดขอบเขตแบบจำลอง (Boundary Condition)	69
5.3 ปริมาณการเพิ่มเติมน้ำการจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	72
5.4 พารามิเตอร์ของชั้นน้ำที่ได้จากการปรับเทียบ (Calibrated parameters)	72
5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำจากการปรับเทียบ	74
5.6 ผลการปรับเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	75
5.7 ผลการปรับเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม	78
5.8 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปีจากการจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	79
5.9 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่มีการใช้น้ำคงที่ ณ ช่วงเวลา 10 ปี	89
5.10 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ณ ช่วงเวลา 10 ปี	93
5.11 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ณ ช่วงเวลา 10 ปี	98

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.12 สมดุลน้ำบาดาลแบ่งย่อยตามประเภทชั้นหินอุ้มน้ำ (Zone budget) ในสถานะ การใช้น้ำปัจจุบัน	100
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับระยะน้ำลดสูงสุด	101

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 แผนที่เทศบาลนครสงขลา	4
2.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาบริเวณเทศบาลนครสงขลา	6
2.2 แผนที่แสดงการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่เทศบาลนครสงขลา	9
2.3 แผนที่แสดงลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของเทศบาลนครสงขลา	10
2.4 แผนที่แสดงลักษณะทางธรณีวิทยาของเทศบาลนครสงขลา	11
2.5 แผนภาพแสดงการทดลองการไหลของน้ำตามกฎของดาร์ซี	13
2.6 แผนภาพแสดงลักษณะการไหลและเสดของน้ำใต้ดินในพื้นที่รับน้ำ พื้นที่ป็นน้ำและพื้นที่ สูญเสียน้ำ	15
2.7 แผนภาพแสดงระบบการไหลของน้ำใต้ดิน	16
2.8 รูปตัดขวางแสดงประเภทของชั้นหินอุ้มน้ำ	16
2.9 Zone of dispersion	21
2.10 Ghyben-Herzberg Relation	22
2.11 ลักษณะการเกิด Drawdown cone	22
2.12 การแพร่กระจายเชิงอุทกพลศาสตร์	24
2.13 ลักษณะการแบ่งพื้นที่ในการคำนวณ โดยวิธี Finite difference ใน MODFLOW	28
2.14 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม SEAWAT ใน MODFLOW	29
2.15 แผนที่บริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำในออสเตรเลีย	33
2.16 แผนที่ของที่ราบลุ่มชายฝั่งทะเล Korba ประเทศตูนิเซีย	34
3.1 แผนที่แสดงแนวของภาพตัดขวางทางอุทกธรณีและบ่อบาดาล	43
3.2 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนวตะวันออก – ตะวันตก A-A'	44
3.3 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนวตะวันออก – ตะวันตก B-B'	45
3.4 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนวเหนือ – ใต้ C-C'	46
4.1 แผนที่แสดงตำแหน่งบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษา	51
4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ (a) อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำบาดาล (b)	54
4.3 การตรวจวัดระดับน้ำในสนาม (a) การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในสนาม (b)	54
4.4 แผนที่แสดงระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำสมิหลา (ธันวาคม 2551)	55

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.5	แผนที่แสดงระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำบ่ออย่าง (ธันวาคม 2551)	56
4.6	ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ (ชั้นน้ำสมิหลา, มิถุนายน 2552)	60
4.7	ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ (ชั้นน้ำบ่ออย่าง, มิถุนายน 2552)	61
5.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	62
5.2	แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของเทศบาลนครสงขลา	64
5.3	กรณีจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของน้ำเค็ม	66
5.4	การออกแบบกริดแบบจำลอง	67
5.5	ตำแหน่งบ่อบาดาลและขอบเขตของแบบจำลอง (a) บ่อบาดาลและบ่อสังเกตการณ์ (b) การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง	71
5.6	ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (a) ฤดูร้อน ณ วันที่ 3,465 (b) ฤดูฝน ณ วันที่ 3,641	75
5.7	ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีความหนาแน่นของน้ำคั่งที่ (a) ฤดูร้อน ณ วันที่ 3,465 (b) ฤดูฝน ณ วันที่ 3,641	77
5.8	ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คั่งที่ (a) ฤดูร้อน ณ วันที่ 3,465 (b) ฤดูฝน ณ วันที่ 3,641	77
5.9	ผลการจำลองแสดงทิศทางการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (a) ชั้นน้ำสมิหลา (b) ชั้นน้ำบ่ออย่าง (c) ชั้นน้ำสงขลา (ธันวาคม 2551)	80
5.10	ภาพตัดขวางแสดงทิศทางการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	81
5.11	ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มในรูปของครอไรด์ในสภาวะการใช้น้ำในปัจจุบัน	82
5.12	ความแตกต่างระหว่างกรณี (a) ความหนาแน่นของน้ำคั่งที่ (b) ความหนาแน่นของน้ำไม่คั่งที่ ในชั้นน้ำสมิหลา	83
5.13	ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	84
5.14	ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่มีการใช้น้ำคั่งที่ ในเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553 -2562)	86
5.15	ระดับน้ำลด (Drawdown) กรณีที่มีการใช้น้ำคั่งที่ ในเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)	87
5.16	การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่มีการใช้น้ำคั่งที่ ในเวลา 10 ปี (พ.ศ.2553-2562)	88

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)	90
5.18 ระดับน้ำลด (Drawdown) กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)	91
5.19 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)	92
5.20 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)	95
5.21 ระดับน้ำลด (Drawdown) กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)	96
5.22 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)	97
5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับระยะน้ำลดสูงสุดในชั้นน้ำสมิหลา	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

น้ำบาดาล หรือน้ำใต้ดิน (Groundwater) คือ น้ำที่แทรกซึมอยู่ระหว่างอนุภาคดิน น้ำบาดาลมีต้นกำเนิดจากน้ำฝนและน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินไหลซึมผ่านชั้นดินลงไปกักเก็บอยู่ระหว่างอนุภาคของชั้นดินหรือภายในรอยแตกของชั้นหิน ชั้นดินหรือชั้นหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เรียกว่า “ชั้นหินให้น้ำ” (aquifer) การพัฒนาน้ำบาดาลมาใช้ โดยทั่วไปมีจุดประสงค์หลักเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมากที่สุด แต่การนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณมาก ๆ อาจทำให้ความสมดุลระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและสูบน้ำออกจากชั้นน้ำเสียไป ดังนั้นการบริหารจัดการการสูบน้ำที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ระดับน้ำที่กักเก็บในชั้นน้ำลดลงและปริมาณน้ำเสียสมดุล ส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเช่นการลดลงของระดับน้ำและการรุกคืบของน้ำเค็ม เป็นต้น

แหล่งน้ำบาดาลในกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาจัดเป็นแหล่งน้ำคุณภาพดีสามารถนำมาผลิตเป็นน้ำดื่มน้ำใช้ได้ ดังนั้นจึงนิยมนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ปัจจุบันความต้องการใช้น้ำบาดาลในกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาเพิ่มขึ้นเป็นลำดับมาโดยตลอด ซึ่งปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่มากขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อปริมาณและคุณภาพของแหล่งน้ำบาดาลได้ โดยเฉพาะในพื้นที่เมืองหลักอย่างเทศบาลนครสงขลาซึ่งเป็นแหล่งรวมของหน่วยงานราชการและมีแหล่งท่องเที่ยวต่าง ๆ มากมาย โดยทั่วไปน้ำบาดาลที่ประชากรในพื้นที่นำขึ้นมาอุปโภคบริโภคจะมาจากชั้นน้ำผิวดินและจากชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนหินร่วนซึ่งมีความลึกประมาณ 20 ถึง 30 เมตรจากระดับผิวดินซึ่งมีการเชื่อมโยงโดยตรงกับน้ำทะเล เพราะในบริเวณพื้นที่เทศบาลนครสงขลามีลักษณะภูมิประเทศเป็นแหลมที่ยื่นออกไปในทะเล

การศึกษาในครั้งนี้ต้องการศึกษาศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล และความเป็นไปได้ของการรุกคืบของน้ำเค็มในเทศบาลนครสงขลาในปัจจุบันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของมวลสาร (Groundwater flow and solute transport modeling) โดยใช้โปรแกรม MODFLOW, MT3DMS และ SEAWAT ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปใช้คาดการณ์การรุกคืบของน้ำเค็มและกำหนดปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่เหมาะสม (Safe yield)

ในอนาคตได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปใช้ในการบริหารจัดการการใช้น้ำบาดาลได้ในพื้นที่ศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 ศึกษาสภาพทางธรณีและอุทกธรณีของชั้นน้ำในพื้นที่เทศบาลนครสงขลา
- 1.2.2 ศึกษาการไหลและสมดุลของน้ำใต้ดินในพื้นที่เทศบาลนครสงขลา
- 1.2.3 ศึกษารูปแบบและขอบเขตของการรุกของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาและอ่าวไทยสู่ชั้นน้ำใต้ดิน
- 1.2.4 สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์จำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการรุกของน้ำเค็ม โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ให้ความหนาแน่นของมวลสารแปรผันได้ (Variable Density) เพื่อนำไปใช้ในการคาดคะเนการรุกของน้ำใต้ดินในอนาคตเมื่อมีการใช้น้ำในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อการบริหารจัดการน้ำใต้ดินทั้งทางด้านปริมาณและคุณภาพอย่างยั่งยืนต่อไป

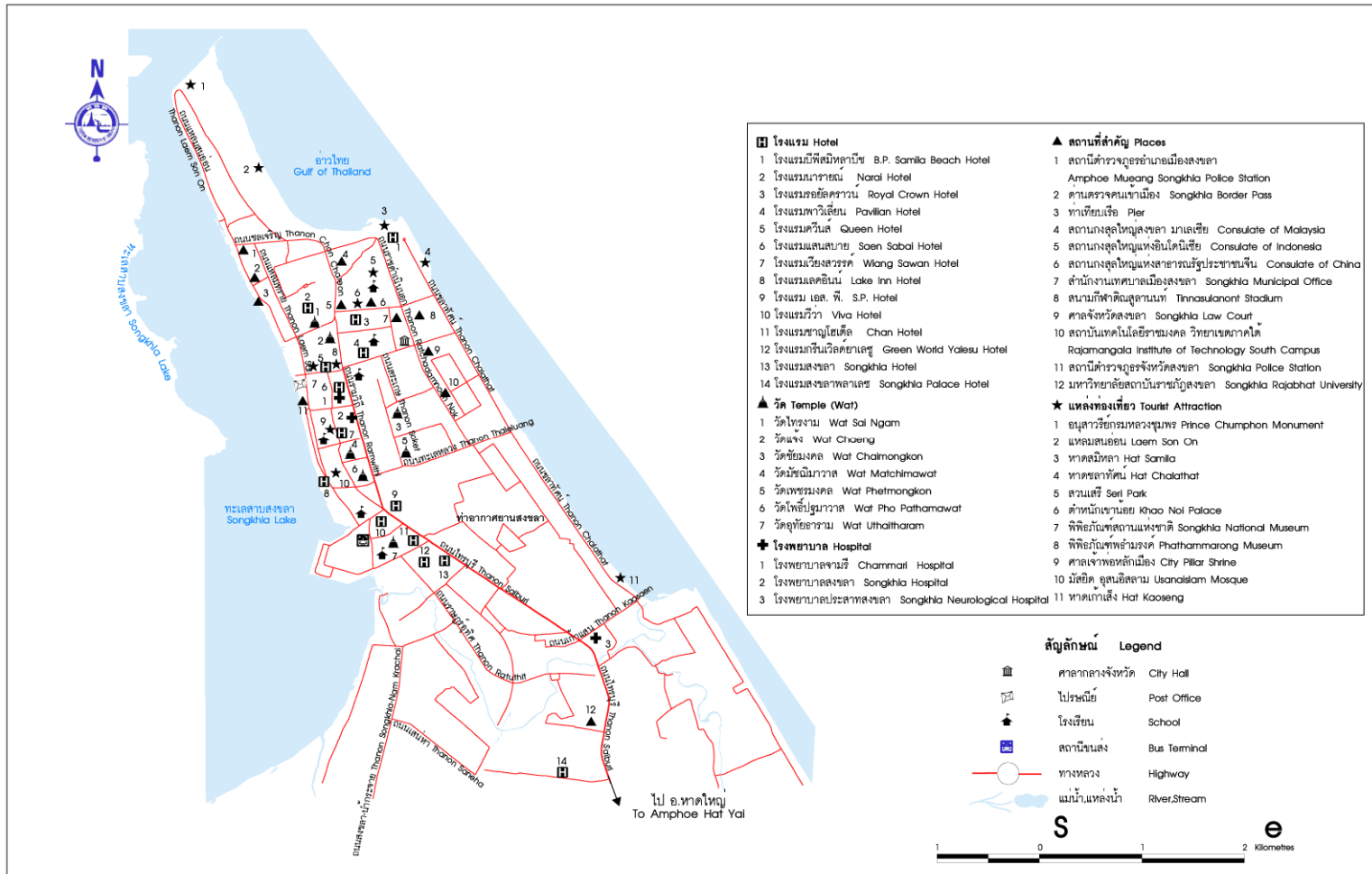
1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษานี้จะศึกษาพื้นที่ที่เป็นชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนหินร่วน (Unconsolidated aquifers) ในพื้นที่เทศบาลนครสงขลาเท่านั้น ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาด้านทิศตะวันออกติดกับอ่าวไทยและทิศตะวันตกติดกับทะเลสาบสงขลา ส่วนทางทิศใต้ได้ทำการตัดบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าถนนชลทัศน์ตัดกับถนนเก้าเส้งออกเป็นแนวตรงจากทิศตะวันออกไปจนถึงทิศตะวันตกเพื่อให้ได้เฉพาะพื้นที่ศึกษาที่เป็นแหลมยื่นออกไปในทะเลเท่านั้น โดยการเก็บตัวอย่างน้ำจะเก็บจากบ่อบาดาลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลที่เจาะไว้ภายในเทศบาลนครสงขลา

1.4 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

- 1.4.1 ทราบถึงปริมาณการใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษารวมถึงคุณสมบัติของชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่เทศบาลนครสงขลา
- 1.4.2 ทราบถึงกลไกและขอบเขตการรุกของน้ำเค็มในบริเวณพื้นที่เทศบาลนครสงขลาในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบันและอนาคต

1.4.3 สามารถกำหนดปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่เหมาะสมในรูปของแผนที่ (Safe yield map) โดยไม่ก่อให้เกิดการรุกของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาสู่ชั้นน้ำบริเวณพื้นที่เทศบาลนครสงขลา



รูปที่ 1.1 แผนที่เทศบาลนครสงขลา

บทที่ 2

การทบทวนเอกสาร

การศึกษาการไหลของน้ำใต้ดินและการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในบริเวณเทศบาลนครสงขลา จำเป็นจะต้องเข้าใจถึงสภาพพื้นที่ศึกษา ระบบการไหลและกระบวนการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินรวมทั้งการเลือกใช้แบบจำลองที่จะนำมาประยุกต์ใช้ให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทั้งหมดโดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ 1) ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา 2) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับน้ำบาดาลและสารปนเปื้อน 3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ 4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

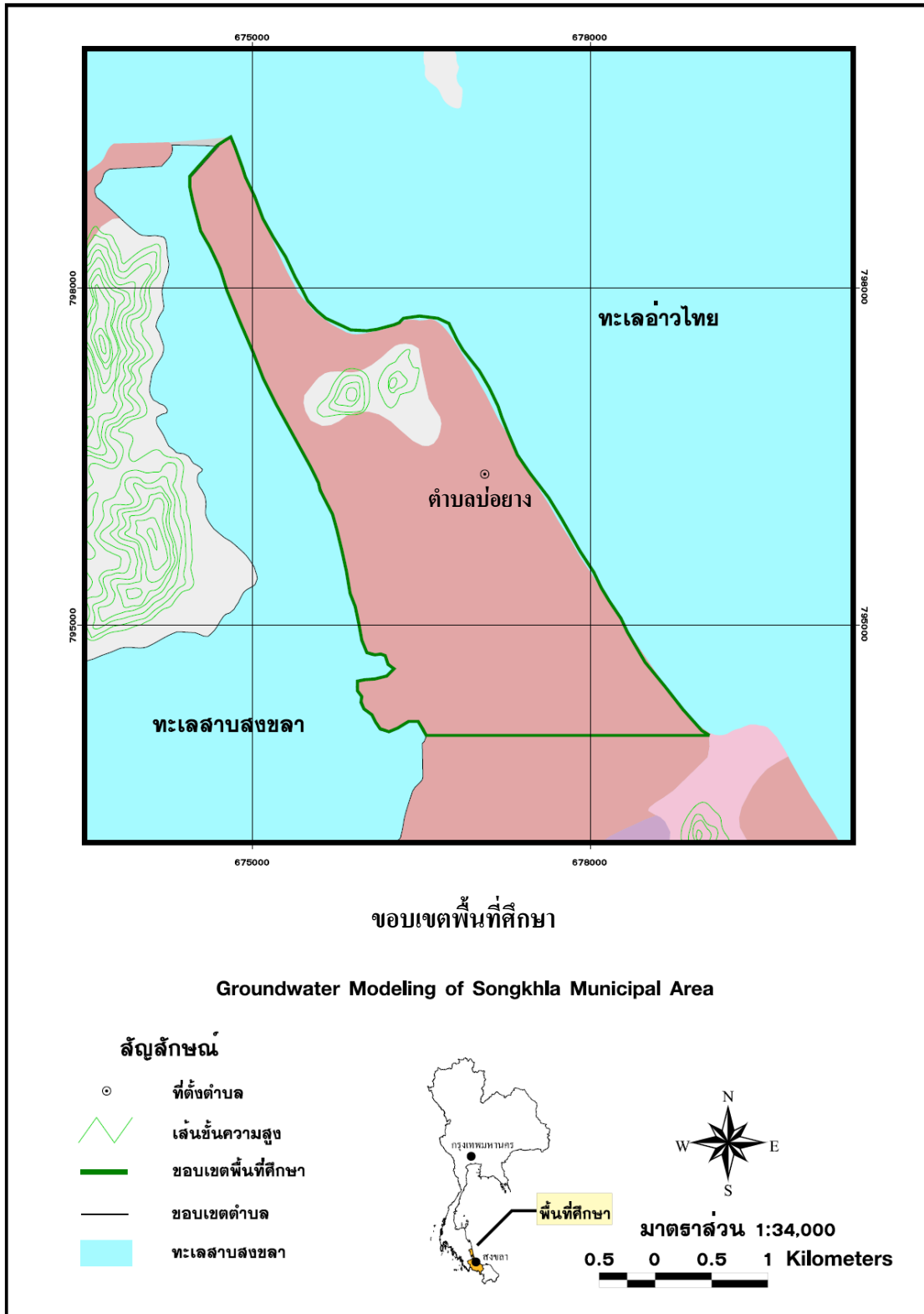
2.1 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

สภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ลักษณะทางอุทกธรณี ลักษณะการไหลของน้ำบาดาล ศักยภาพของน้ำบาดาล ของชั้นน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่เทศบาลนครสงขลาที่ได้มีการวิจัยไว้แล้วสามารถรวบรวมได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 ที่ตั้งและอาณาเขตของเทศบาลนครสงขลา

เทศบาลนครสงขลาอยู่ในเขตพื้นที่ตำบลบ่อยางทั้งหมด มีลักษณะเป็นแหลมอยู่ระหว่างทะเลสาบสงขลาที่ฝั่งทะเลหลวง (อ่าวไทย) พื้นที่ 9.27 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 5,739.75 ไร่ ตั้งอยู่ ณ เส้นรุ้งที่ 7 องศาเหนือ และเส้นแวงที่ 101 องศาตะวันออก (รูปที่ 2.1) มีจำนวนประชากรประมาณ 74,000 คน อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครตามเส้นทางรถไฟ 947 กิโลเมตร ตามทางหลวงแผ่นดิน 950 กิโลเมตร และทางทะเลประมาณ 725 กิโลเมตร เทศบาลนครสงขลา มีอาณาเขตติดต่อกับพื้นที่ใกล้เคียง ดังนี้

- ทิศเหนือ ติดต่อกับเขตอำเภอสิงหนคร
- ทิศใต้ ติดต่อกับเทศบาลตำบลเขารูปช้าง
- ทิศตะวันออก ติดต่อกับอ่าวไทย
- ทิศตะวันตก ติดต่อกับทะเลสาบสงขลา



รูปที่ 2.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาบริเวณเทศบาลนครสงขลา

ลักษณะภูมิประเทศพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่ราบชายฝั่งทะเล มีลักษณะเอียงลาดจากฝั่งทะเลหลวงไปทางด้านทะเลสาบ รูปร่างของพื้นที่มีลักษณะเป็นแหลมแคบยาวตามแนวทิศใต้สู่ทิศเหนือลงสู่ทะเล ระหว่างทะเลสาบสงขลาทางด้านตะวันตกและทะเลอ่าวไทย ทางด้านตะวันออกมีชายหาดที่สวยงาม หาดทรายขาวสะอาด จากหาด เก้าเส้า ชลาทัศน์ สมิหลา แหลมสนอ่อน ความยาวประมาณ 8 กิโลเมตร ระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางเฉลี่ย 4 เมตร ระดับน้ำใต้ดินลึกจากผิวดินประมาณ 1 – 3 เมตร ด้านริมฝั่งทะเลสาบเหมาะแก่การจอดเรือ เพราะคลื่นลมสงบ ชายฝั่งไม่ลาดชัน ภายในเขตเทศบาลมีภูเขาเล็ก ๆ ทางด้านเหนือจำนวน 2 ลูก คือ เขาน้อยและ เขาตังกวน ยอดเขาสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 60 และ 80 เมตร ตามลำดับ (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

2.1.2 สภาพภูมิอากาศ

เทศบาลนครสงขลามีพื้นที่อยู่ในเขตอิทธิพลของลมมรสุมเมืองร้อน มีลมมรสุมพัดผ่านประจำปีคือลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เริ่มตั้งแต่มิถุนายนถึงกลางเดือนมกราคม และ มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เริ่มตั้งแต่มิถุนายนถึงกลางเดือนตุลาคม (สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดสงขลา, 2548) จากอิทธิพลของลมมรสุมดังกล่าว ส่งผลให้เกิดฤดูกาลเพียง 2 ฤดู คือ

- ฤดูร้อน - เริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนกรกฎาคม
- ฤดูฝน - เริ่มตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนมกราคม

2.1.3 การใช้ประโยชน์ที่ดิน

จากลักษณะภูมิประเทศซึ่งประกอบไปด้วย พื้นที่ภูเขา ที่ราบลูกคลื่น และที่ราบ ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่ศึกษาจากกรมพัฒนาที่ดิน ปี พ.ศ. 2543 พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของเทศบาลนครสงขลาเป็นพื้นที่ย่านการค้า สถานที่พักผ่อนหย่อนใจ และ สถานที่ราชการ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่ศึกษา แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ซึ่งประกอบด้วย

- 1) พื้นที่ที่อยู่อาศัยและอุตสาหกรรม ได้แก่ หมู่บ้าน ตัวเมืองย่านการค้า โครงการที่ดินจัดสรร และ โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

- 2) สถานที่พักผ่อนหย่อนใจ ได้แก่ สวนเสรี ที่ตั้ง บริเวณเขาน้อย ลานพระรูปกรมหลวงชุมพร ฯ ที่ตั้ง บริเวณแหลมสนอ่อน เจดีย์เขาดังกวน (มีลิฟท์บริการขึ้น-ลง) ที่ตั้ง บริเวณเขาดังกวน แหลมสมิหลา ที่ตั้ง เขตเทศบาลนครสงขลา เป็นต้น
- 3) สถานที่ราชการ ได้แก่ กองเรือภาคที่ 2 ฐานทัพเรือสงขลา สำนักงานการประปาเขต 5 สงขลามหาวิทยาลัยทักษิณ สถาบันราชภัฏสงขลา โรงพยาบาลประสาทสงขลา เป็นต้น
- 4) ป่าไม้ผลัดใบ คือ ป่าไม้บริเวณเขาดังกวน

2.1.4 ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา

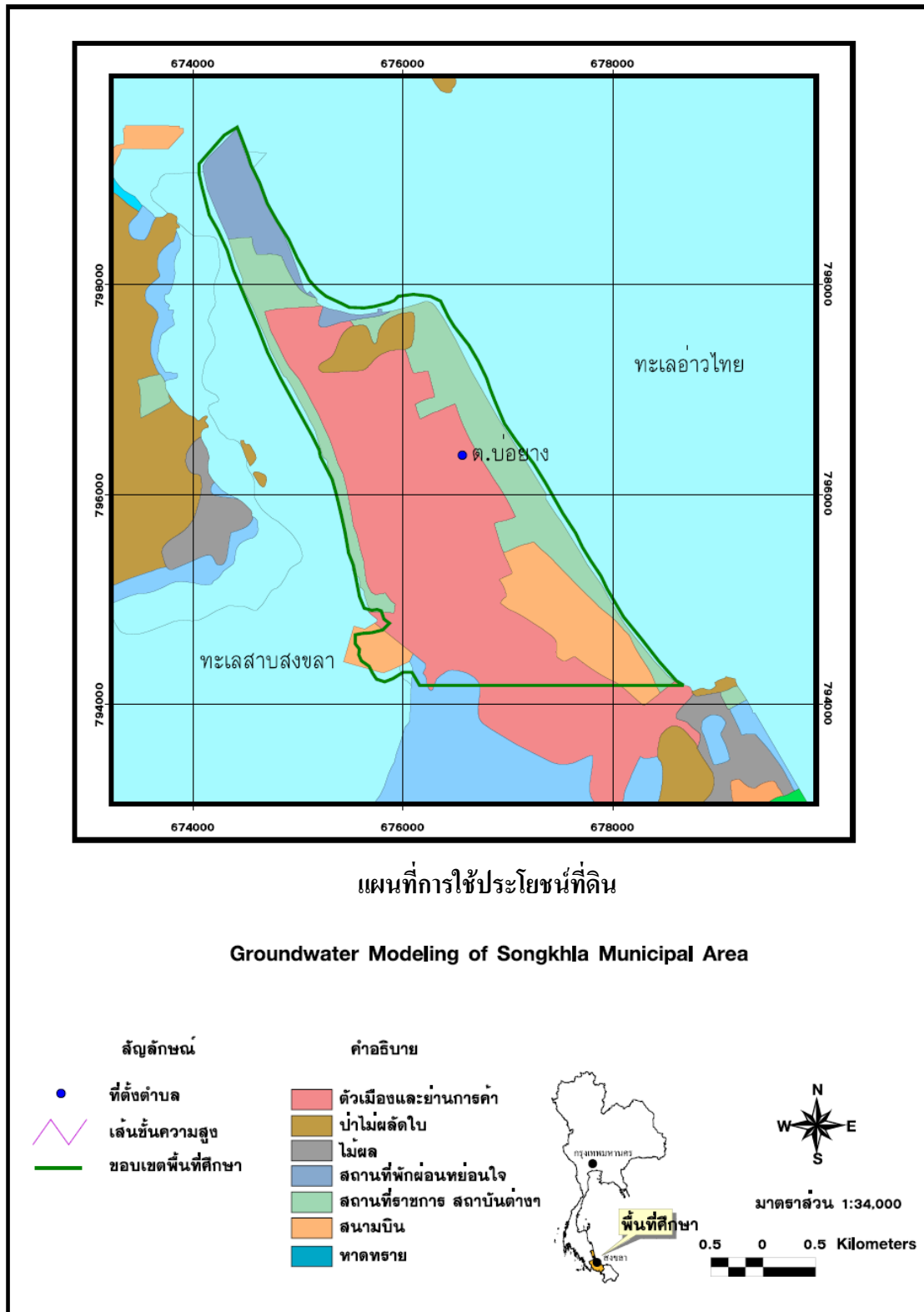
จากข้อมูลการใช้แผนที่น้ำบาดาล (กรมทรัพยากรธรณี, 2544) สรุปได้ว่า แหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่เทศบาลนครสงขลาประกอบไปด้วยน้ำบาดาลที่ถูกเก็บอยู่ภายในตะกอนหินร่วนและหินแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนี้

1. แหล่งน้ำบาดาลในตะกอนดินร่วน (Unconsolidated Aquifer)

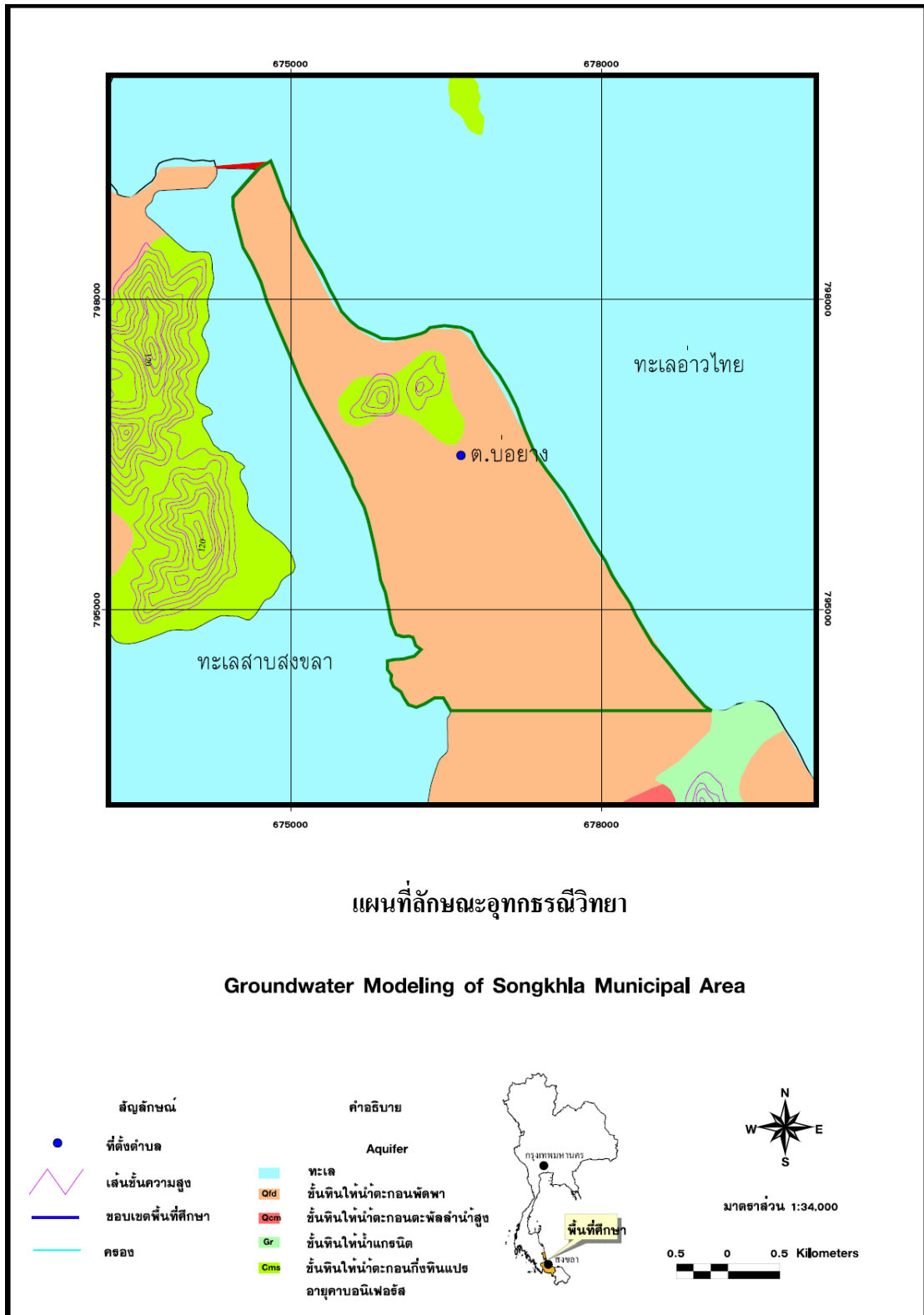
น้ำบาดาลจะถูกกักเก็บอยู่ภายในช่องว่างของชั้นตะกอนที่ยังไม่จับตัวและเชื่อมประสาน ซึ่งเป็นชั้นหินให้น้ำตะกอนพัดพา (Floodplain Deposits Aquifer; Qfd) เป็นชั้นหินให้น้ำประกอบด้วย กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว โดยน้ำบาดาลจะถูกกักเก็บอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดกรวด ทราย ที่สะสมอยู่ในที่ราบลุ่มน้ำหลากบริเวณแนวคดโค้งของทางน้ำและบริเวณที่ราบชายฝั่งทะเลที่เกิดจากการพัดพาของทางน้ำ โดยทั่วไปจะพัฒนาน้ำบาดาลที่ระดับความลึก 30-60 เมตร ปริมาณน้ำที่ได้อยู่ในเกณฑ์ 10-30 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง บางบริเวณคุณภาพน้ำกร่อยถึงเค็มเนื่องจากการรุกคืบของน้ำทะเล ตะกอนชุดนี้วางตัวอยู่บนตะกอนทางน้ำเก่าปัจจุบัน

2. แหล่งน้ำบาดาลในหินแข็ง (Consolidated Aquifer)

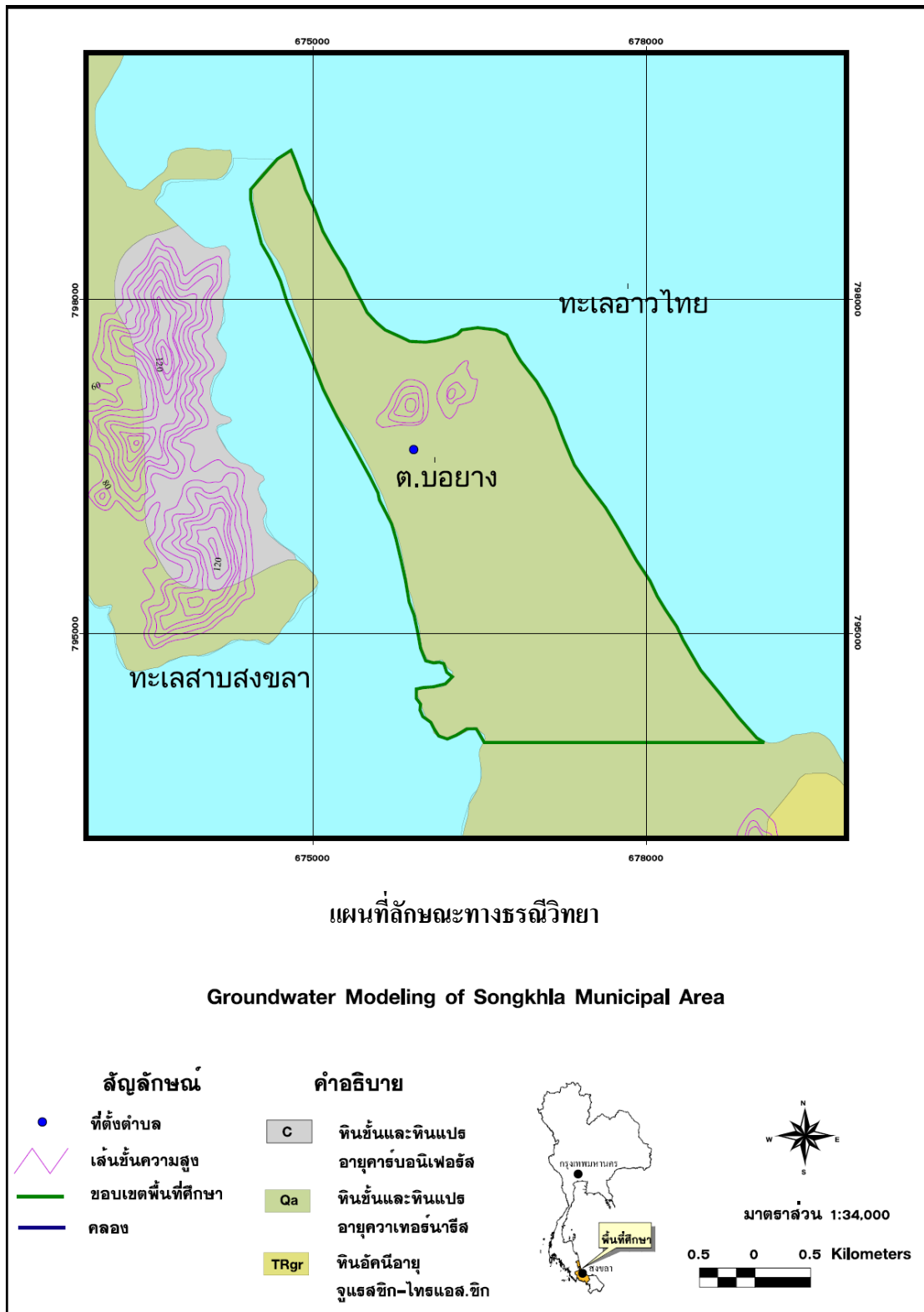
น้ำบาดาลจะถูกกักอยู่ในชั้นตะกอน หินตะกอนกึ่งหินแปร หินแปร และหินอัคนี ซึ่งเป็นชั้นหินให้น้ำตะกอนกึ่งหินแปรยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous Meta-sedimentary Aquifer, Cms) ประกอบด้วยหินดินดาน หินทรายแป้ง หินทราย หินชนวน หินฟิลไลต์ และหินควอร์ตไซต์ น้ำบาดาลถูกกักเก็บอยู่ในรอยแตก รอยแยก รอยเลื่อน และบริเวณที่หินผุ



รูปที่ 2.2 แผนที่แสดงการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่เทศบาลนครสงขลา (กรมพัฒนาที่ดิน, 2543)



รูปที่ 2.3 แผนที่แสดงลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของเทศบาลนครสงขลา (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)



รูปที่ 2.4 แผนที่แสดงลักษณะทางธรณีวิทยาของเทศบาลนครสงขลา (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

2.1.5 ลักษณะทางธรณีวิทยา

ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยาจากคู่มือการใช้แผนที่น้ำบาดาล (กรมทรัพยากรธรณี, 2544 ปัจจุบันกรมทรัพยากรน้ำบาดาล) สรุปได้ว่า ในพื้นที่เทศบาลนครสงขลาประกอบไปด้วย หินชั้นและหินแปรยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) ดังแสดงใน รูปที่ 2.4 ได้แก่ชั้นของตะกอนที่มีอายุอยู่ในช่วง 140 ล้านปี – อายุปัจจุบัน ประกอบไปด้วยตะกอน กรวด ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว ลูกรัง และเศษหินที่ถูกพัดพามาสะสมตัวกัน โดยตัวกลางชนิดต่างๆ เช่น แม่น้ำ ทะเล และลม เป็นต้น พบทั่วไปบริเวณที่ราบระหว่างภูเขา ที่ราบลุ่มแม่น้ำและที่ราบชายฝั่งทะเลซึ่งเป็นพื้นที่หลักในการศึกษาครั้งนี้

ตะกอนชุดนี้เป็นตะกอนที่ยังไม่มีการจับตัวและเชื่อมประสานเป็นหินแข็ง ยกเว้นในบางบริเวณที่อาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำบาดาลทำให้ตะกอนบางส่วนถูกเชื่อมประสานด้วยแร่เหล็กที่ถูกพัดพามากับน้ำบาดาลกลายเป็นชั้นลูกรังหรือสีลาแลง (Laterite) ความหนาของชั้นลูกรังขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลนั้นๆ ตะกอนยุคควอเทอร์นารีที่พบในพื้นที่ศึกษา ประกอบไปด้วยตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึง (Floodplain deposits) ได้แก่ ชั้นของตะกอน กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ที่ถูกพัดพามาสะสมตัวโดยทางน้ำในบริเวณที่ราบลุ่มน้ำหลาก ขนาดของตะกอนกรวดทรายเล็กกว่า 2 เซนติเมตร รูปร่างของเม็ดตะกอนมีเหลี่ยมคมเล็กน้อยถึงค่อนข้างกลมมน การคัดขนาดปานกลาง ประกอบไปด้วยแร่ควอตซ์ และเชิร์ต เป็นส่วนใหญ่

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับน้ำบาดาลและสารปนเปื้อน

2.2.1 การไหลของน้ำบาดาล

ในสภาพธรรมชาติน้ำบาดาลจะไหลอย่างต่อเนื่อง จากที่สูงไปยังที่ที่มีระดับต่ำกว่า การไหลของน้ำบาดาลผ่านชั้นน้ำซึ่งมีรูพรุนเป็นไปตามกฎศาสตร์ของไหล ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวอธิบายได้ด้วยกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) และกฎทรงมวล (Law of Conversation of Mass or Continuity Principle) (Fetter, 1994)

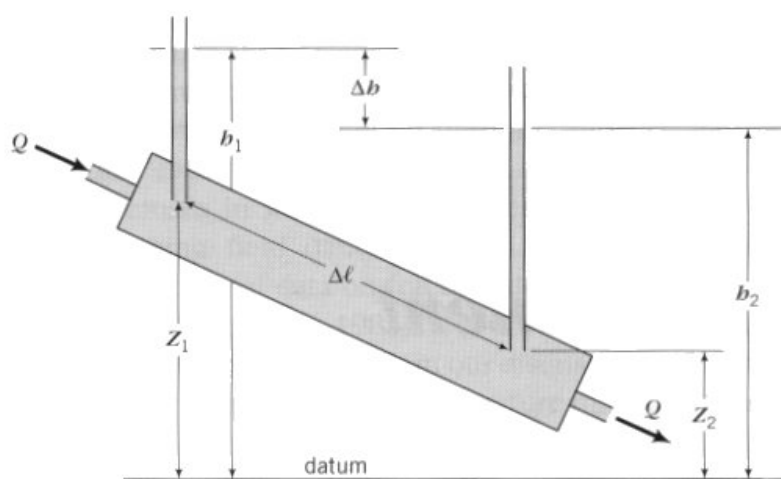
1.2.1-1 กฎของดาร์ซี (Darcy's law)

ความสัมพันธ์ของการไหลของน้ำตามกฎของดาร์ซีได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 และสมการ 2-1 กล่าวคือ อัตราการไหลของน้ำ (Q) ผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) ของตัวกลางที่มีความพรุนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าคงที่ค่าหนึ่ง (K) นอกจากนี้อัตราการไหลแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของระดับน้ำ 2 จุด ($h_2 - h_1$, Δh) แต่จะเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางที่น้ำไหลผ่าน ($l_2 - l_1$, Δl) ค่าคงที่ K เป็นค่าความนำชลศาสตร์ (hydraulic conductivity) และเป็นค่าเฉพาะของตัวกลางแต่ละชนิด มีหน่วยเป็น ความยาวต่อเวลา เครื่องหมายลบแสดงถึงการไหลของน้ำบาดาลจากที่มีระดับน้ำสูง ไปยังที่มีระดับน้ำต่ำกว่า

$$Q = -KA \frac{h_2 - h_1}{l_2 - l_1} = -KA \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2-1)$$

ดังนั้นอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Specific discharge) หรือความเร็วการไหลของน้ำ (Darcy velocity, v) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของระดับน้ำต่อหน่วยระยะทางการไหลของน้ำ (สมการ 2-2)

$$\frac{Q}{A} = v = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2-2)$$



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการทดลองการไหลของน้ำตามกฎของดาร์ซี (Domenico and Schwartz, 1998)

เมื่อ	v	=	อัตราการไหลของน้ำบาดาลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ [LT^{-1}]
	K	=	ค่าความนำชลศาสตร์ [LT^{-1}]
	$\frac{\Delta h}{\Delta l}$	=	ความแตกต่างของระดับน้ำต่อหน่วยระยะทางระหว่างจุด 2 จุดที่น้ำไหลผ่าน

1.2.1-2 กฎทรงมวล

ตามกฎทรงมวล มวลสารที่อยู่ในปริมาตรหน่วยเล็กๆ ของชั้นน้ำจะไม่หายไปไหน ถ้าหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลสารในปริมาตรหน่วยเล็กๆ นั้น ปริมาณของมวลสารที่ไหลเข้า (inflow) จะสมดุลกับปริมาณของมวลสารที่ไหลออก (outflow) ดังสมการ 2-3

$$\text{Inflow} = \text{Outflow} \quad (2-3)$$

ถ้าการไหลออกน้อยกว่าการไหลเข้า จะเกิดการกักเก็บ (Storage) ของมวลสารของของเหลวในปริมาตรหน่วยเล็กๆ นั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมวลสารที่ถูกกักเก็บจะมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและปริมาณน้ำที่ไหลออก ดังสมการ 2-4

$$\text{Inflow} - \text{Outflow} = \text{Storage} \quad (2-4)$$

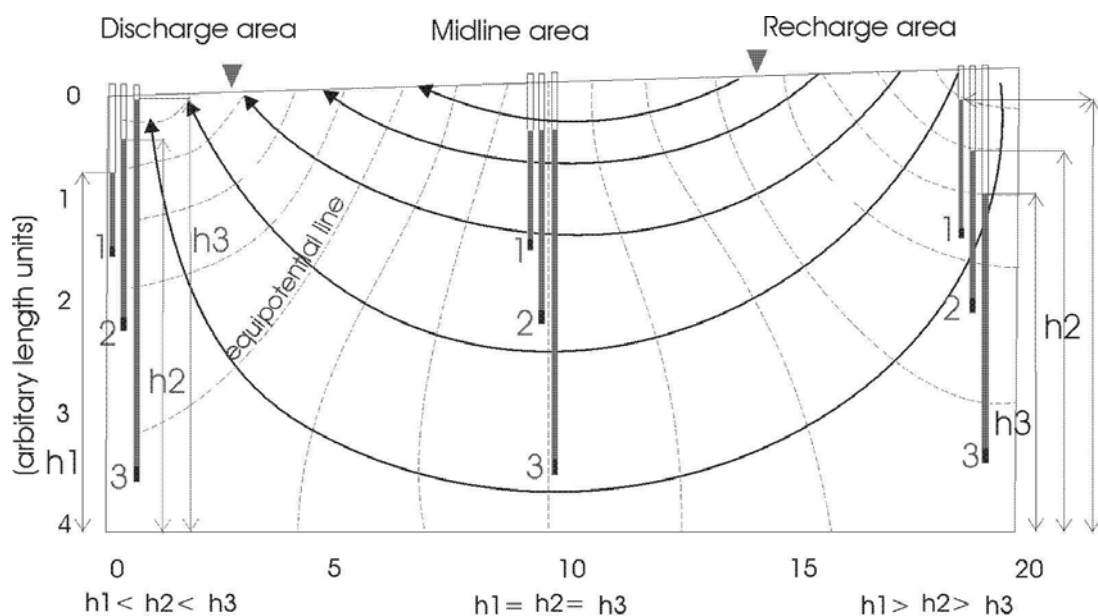
1.2.1-3 ระบบการไหลของน้ำใต้ดิน

การวิเคราะห์การไหลของน้ำบาดาลในแอ่งกักเก็บจะต้องวิเคราะห์สภาพอุทกธรณี (ประกอบด้วย ภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ธรณีวิทยา อุทกธรณีเคมี และ ข้อมูลที่เป็นองค์ประกอบของวัฏจักรของน้ำในระบบอุทกวิทยา) ร่วมกับข้อมูลชลศาสตร์การไหลของน้ำบาดาลในแอ่งกักเก็บ (Toth, 1963) ระบบการไหลของน้ำบาดาลประกอบด้วยพื้นที่ 3 ส่วน คือ พื้นที่รับน้ำ (Recharge area) เป็นพื้นที่ที่น้ำบาดาลไหลลง พื้นที่ปันน้ำ (Midline area) เป็นพื้นที่ที่น้ำบาดาลไหลในแนวราบ และพื้นที่สูญเสียน้ำ (Discharge area) เป็นพื้นที่ที่น้ำบาดาลไหลขึ้น แต่ละระบบการไหลของน้ำบาดาลมีความสัมพันธ์กับพื้นที่รับน้ำและพื้นที่สูญเสียน้ำ (รูปที่ 2.6) ระดับน้ำอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลหรือเวลา ระบบการไหลของน้ำบาดาลในแอ่งกักเก็บจำแนกได้เป็น 3 ระบบ (รูปที่ 2.7) ดังนี้

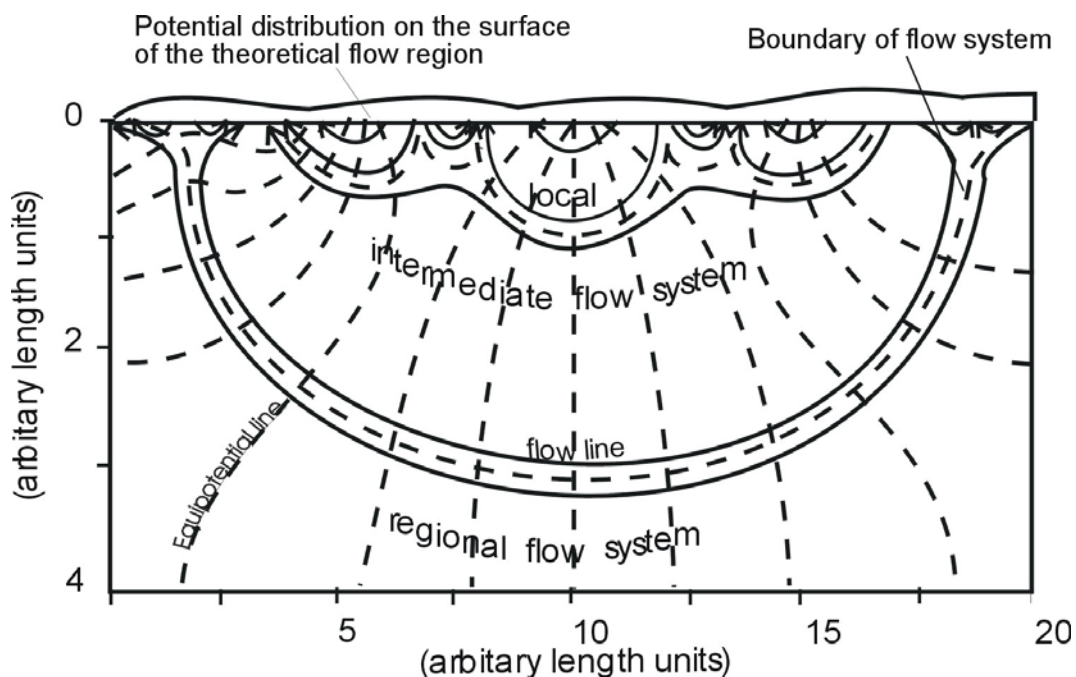
1) ระบบการไหลเฉพาะแห่ง (Local flow system) พื้นที่รับน้ำและพื้นที่สูญเสียน้ำอยู่ในระยะใกล้กัน ทำให้ระยะทางและระยะเวลาการไหลสั้น การไหลของน้ำอยู่ในระดับชั้นทิศทางและอัตราการไหลของน้ำไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับการซึมของน้ำเข้าสู่ระบบน้ำบาดาลและการคายระเหยที่ผิวดิน มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในแนวโค้งค่อนข้างสูง

2) ระบบการไหลระดับกลาง (Intermediate flow system) การไหลของน้ำบาดาลเกิดเป็นบริเวณกว้างขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตามฤดูกาลน้อย

3) ระบบการไหลบริเวณกว้าง (Regional flow system) มีสันปันน้ำของแอ่งกักเก็บน้ำบาดาลเป็นพื้นที่รับน้ำ บริเวณที่มีระดับภูมิประเทศต่ำที่สุดของแอ่งน้ำบาดาลเป็นพื้นที่สูญเสียน้ำ ระยะการไหลครอบคลุมอาณาบริเวณไกลและลึก อัตราการไหลของน้ำช้าและอุณหภูมิก่อนข้างสูง



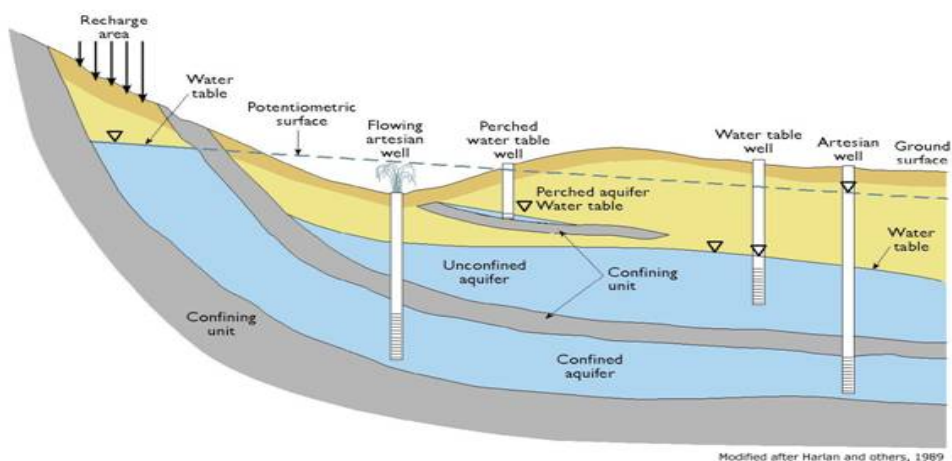
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงลักษณะการไหลและเสดของน้ำใต้ดินในพื้นที่รับน้ำ พื้นที่ปันน้ำ และพื้นที่สูญเสียน้ำ (เกรียงศักดิ์ ศรีสุข, 2543 ดัดแปลงจาก Toth, 1963)



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงระบบการไหลของน้ำใต้ดิน (Toth, 1963)

2.2.2 ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifers)

ชั้นหินอุ้มน้ำ หมายถึง ชั้นดินหรือหินที่มีน้ำแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือรอยแตกในชั้นหิน และสามารถให้น้ำในปริมาณมากพอที่จะสูบขึ้นมาใช้ได้ มีความสามารถในการกักเก็บน้ำและให้น้ำแตกต่างกันตามลักษณะการเกิดของชั้นหินอุ้มน้ำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดันและชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 รูปตัดขวางแสดงประเภทของชั้นหินอุ้มน้ำ (douglas.co.us/water/What_is_an_Aquifer\$.html)

1) ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined aquifers) เป็นชั้นให้น้ำที่ถูกปิดกั้นด้วยชั้นหินทึบน้ำ (Aquitard) ทั้งด้านบนและด้านล่าง ในธรรมชาติไม่มีชั้นทึบน้ำที่แท้จริง ชั้นหินทึบน้ำส่วนใหญ่จะยอมให้น้ำซึมผ่านได้บ้างหรือค้ำหรือเรียกว่าชั้นหินที่มีการรั่วซึม (Leaky aquifers) ความดันน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำนี้มีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศ น้ำจะถูกเติมเข้าหรือปล่อยออกจากชั้นหินอุ้มน้ำขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ระดับน้ำที่เกิดจากแรงดันและถูกปล่อยให้สูงขึ้นจนหยุดนิ่งเรียกว่า Piezometric head และระดับผิวน้ำนี้จะเรียกว่า Piezometric surface ภายใต้งี้อื่นๆนี้จะทำให้เกิดการอัดตัวของหินและการขยายตัวของน้ำในช่องว่าง เมื่อระดับของน้ำลดลงแรงดันของน้ำจะลดลงด้วย แต่ชั้นหินอุ้มน้ำยังคงอึดตัว ปริมาณของน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจากหนึ่งหน่วยปริมาตรของชั้นหินอุ้มน้ำเมื่อระดับของน้ำลดลงหนึ่งหน่วย เรียกว่า การกักเก็บจำเพาะ (Specific storage, S_s) ซึ่งมีหน่วยต่อระยะทาง (L^{-1}) ช่วงค่าการกักเก็บจำเพาะของชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดันดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ช่วงค่าการกักเก็บจำเพาะของชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Domenico, 1972)

Material	Specific storage (S_s) [m^{-1}]
Plastic clay	$2.6 \times 10^{-3} - 2.0 \times 10^{-2}$
Stiff clay	$1.3 \times 10^{-3} - 2.6 \times 10^{-3}$
Medium-hard clay	$9.2 \times 10^{-4} - 1.3 \times 10^{-3}$
Loose sand	$4.9 \times 10^{-4} - 1.0 \times 10^{-3}$
Dense sand	$1.3 \times 10^{-4} - 2.0 \times 10^{-4}$
Dense sand gravel	$4.9 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-4}$
Rock, fissured, jointed	$3.3 \times 10^{-6} - 6.9 \times 10^{-5}$
Rock, sound	Less than 3.3×10^{-6}

2) ชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (Unconfined aquifers) เป็นชั้นหินอุ้มน้ำที่อยู่ใต้เขตสัมผัสอากาศ เมื่อน้ำถูกปล่อยออกจากชั้นหินอุ้มน้ำจะทำให้ระดับน้ำใต้ดินลดลงเนื่องจากแรงดันลดลง ปริมาตรของน้ำที่ปล่อยออกจากชั้นหินให้น้ำไร้แรงดันต่อหน่วยพื้นที่เมื่อระดับน้ำ (Water table) ลดลง 1 หน่วย เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (Specific yield, S_y) ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดันดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (Morris and Johnson, 1967)

Material	Range of values of S_y	Arithmetic mean of S_y
Sandstone (fine)	0.02 – 0.40	0.21
Sandstone (medium)	0.12 – 0.41	0.27
Siltstone	0.01 – 0.33	0.12
Sand (fine)	0.01 – 0.46	0.33
Sand (medium)	0.16 – 0.46	0.32
Sand (coarse)	0.18 – 0.43	0.30
Gravel (fine)	0.13 – 0.40	0.28
Gravel (medium)	0.17 – 0.44	0.24
Gravel (coarse)	0.13 – 0.25	0.21
Silt	0.01 – 0.39	0.20
Clay	0.01 – 0.18	0.06
Limestone	0 – 0.36	0.14
Schist	0.22 – 0.33	0.26
Tuff	0.02 – 0.47	0.21

2.2.3 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำ

คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำที่สำคัญประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ และ สัมประสิทธิ์การกักเก็บ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.3-1 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity, K)

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของหินอุ้มน้ำคือ อัตราการไหลของน้ำผ่านวัตถุตัวกลางผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับการไหลภายใต้ความลาดชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) 1 หน่วย ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในหินชนิดเดียวกันมีความแตกต่างกันในตำแหน่งและทิศทางโดยแบ่งได้ดังนี้

1) กรณีที่ค่า K ของชั้นให้น้ำไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งต่างๆ จะเรียกว่าเป็นชั้นหินอุ้มน้ำแบบ Homogeneous แต่ถ้าค่า K แปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่ง จะเรียกว่าเป็นชั้นหินอุ้มน้ำแบบ Heterogeneous

2) กรณีที่ค่า K ของชั้นให้น้ำไม่เปลี่ยนแปลงตามทิศทางจะเรียกว่าเป็นชั้นหินอุ้มน้ำแบบ Isotropic แต่ถ้าค่า K แปรเปลี่ยนไปตามทิศทาง จะเรียกว่าเป็นชั้นหินอุ้มน้ำแบบ Anisotropic

ในสภาพความเป็นจริงแล้วตามธรรมชาติชั้นหินอุ้มน้ำจะเป็นแบบ Heterogeneous และ Anisotropic กล่าวคือจะมีค่า K แปรเปลี่ยนทั้งตำแหน่งและทิศทาง ซึ่งจากการแปรเปลี่ยนดังกล่าวทำให้เป็นอุปสรรคในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของน้ำใต้ดิน ดังนั้น จึงนิยมสมมติให้เป็น Homogeneous และ Isotropic ตลอดชั้นความหนาของชั้นให้น้ำเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหา ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของหินอุ้มน้ำดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของหินอุ้มน้ำ (Domenico, 1998)

Material	Hydraulic conductivity (m/sec)	Material	Hydraulic conductivity (m/sec)
Sedimentary		Sedimentary Rock	
Gravel	$3.0 \times 10^{-4} - 3.0 \times 10^{-2}$	Karst and reef limestone	$1.0 \times 10^{-6} - 2.0 \times 10^{-2}$
Sand (coarse)	$9.0 \times 10^{-7} - 6.0 \times 10^{-3}$	Limestone, dolomite	$1.0 \times 10^{-9} - 6.0 \times 10^{-6}$
Sand (medium)	$9.0 \times 10^{-7} - 5.0 \times 10^{-4}$	Sandstone	$3.0 \times 10^{-10} - 6.0 \times 10^{-6}$
Sand (fine)	$2.0 \times 10^{-7} - 2.0 \times 10^{-4}$	Siltstone	$1.0 \times 10^{-11} - 1.4 \times 10^{-8}$
Silt, loess	$1.0 \times 10^{-9} - 2.0 \times 10^{-5}$	Salt	$1.0 \times 10^{-12} - 1.0 \times 10^{-10}$
Till	$1.0 \times 10^{-12} - 2.0 \times 10^{-6}$	Anhydrite	$4.0 \times 10^{-13} - 2.0 \times 10^{-8}$
Clay	$1.0 \times 10^{-11} - 4.7 \times 10^{-9}$	Shale	$1.0 \times 10^{-13} - 2.0 \times 10^{-9}$

2.2.3-2 สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (Transmissivity, T)

ค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำของชั้นหินอุ้มน้ำคือ อัตราการไหลของน้ำผ่านตลอดความหนาของหินอุ้มน้ำภายใต้ความลาดชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) 1 หน่วย สำหรับหินอุ้มน้ำที่มีความหนา b จะมีค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ ดังนี้

$$T = K \cdot b \quad (2-5)$$

เมื่อ	T	=	ค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ, [L ² /T]
	K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, [LT ⁻¹]
	b	=	ความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำ, [L]

2.2.3-3 สัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage Coefficient, S)

ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำคือ ปริมาณของน้ำที่กักเก็บในหินที่อึดตัวไปด้วยน้ำ สามารถกักเก็บหรือปล่อยออกมาจากชั้นหินต่อพื้นที่หน้าตัด 1 หน่วยและต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ (Head) 1 หน่วย สำหรับหินอุ้มน้ำที่มีความหนา b จะมีค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ ดังนี้

$$\text{หินอุ้มน้ำมีแรงดัน} \quad : \quad S = S_s \cdot b \quad (2-6)$$

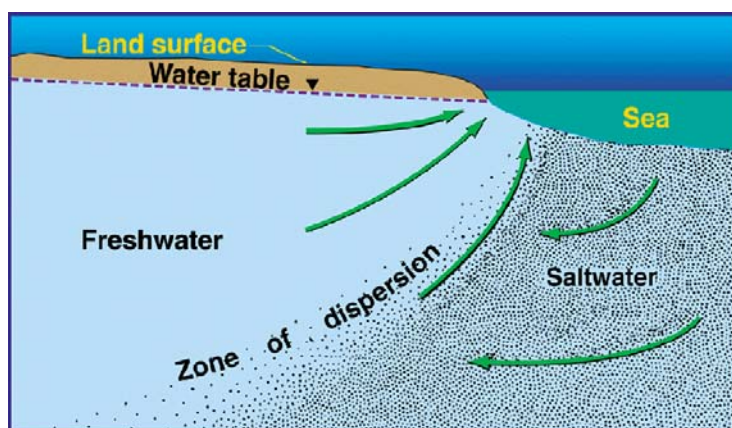
$$\text{หินอุ้มน้ำไร้แรงดัน} \quad : \quad S = S_y + S_s \cdot b \quad (2-7)$$

เมื่อ	S	=	ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำ, [-]
	S _s	=	ค่าการกักเก็บจำเพาะ, [L ⁻¹]
	S _y	=	ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน, [-]
	b	=	ความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำ, [L]

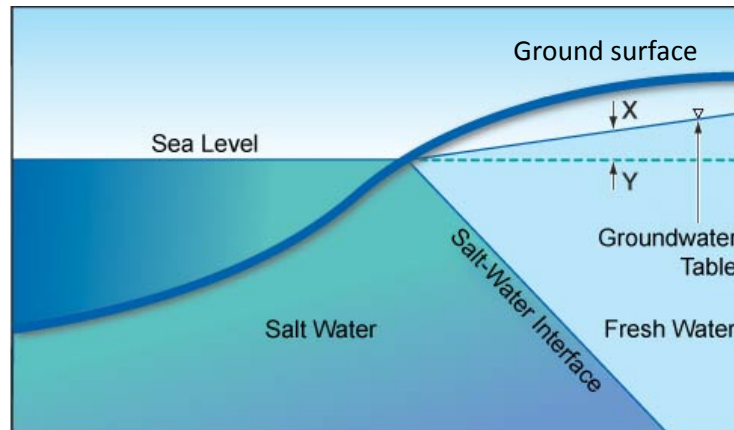
ค่าของ S_y จะมากกว่าค่า S_s มากๆ ดังนั้นค่า S ของชั้นหินให้น้ำไร้แรงดันจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า S_y

2.2.4 หลักการรูก้ำของน้ำเค็ม

ในสภาวะธรรมชาติระดับน้ำบาดาลของชั้นหินอุ้มน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลหรือบริเวณที่เชื่อมต่อกับทะเลสาบ เช่นพื้นที่ศึกษา จะลาดเอียงลงสู่ทะเลเป็นเหตุให้น้ำบาดาลจืดไหลลงสู่ทะเล ลักษณะแนวเชื่อมต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็ม (Hydraulic connection) จะเป็นรูปลิ้ม กล่าวคือ ชั้นน้ำบาดาลจืดอยู่ด้านบน ในขณะที่ชั้นน้ำบาดาลเค็มจะอยู่ด้านล่าง เนื่องจากน้ำจืดและน้ำเค็มที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน (Variable density) โดยที่น้ำจืดจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำเค็ม ทำให้แนวเชื่อมต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มจะเป็น Transitional zone จากน้ำเค็มไปสู่ น้ำจืด หรือเรียกว่าเกิดการแพร่กระจาย (Dispersion) น้ำเค็มสู่น้ำจืด ซึ่งบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนระหว่างสองน้ำนี้โดยปกติความกว้างของโซนจะแคบ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของชั้นน้ำ ดังนั้นจึงถือว่าแนวนี้เป็นแนวขอบเขตระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็ม เส้นขอบเขตระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มจะไม่ชันแต่จะค่อยๆ เปลี่ยนไปเรื่อยๆ ไม่มีที่สิ้นสุด เรียกบริเวณนี้ว่า Zone of dispersion หรือ Zone of mixing (รูปที่ 2.9) ความสัมพันธ์ระหว่างแนวน้ำจืดน้ำเค็มนี้ทำให้บางส่วนของชั้นน้ำจืดอาจจะมีน้ำเค็มอยู่ในขณะที่ส่วนอื่นๆ ยังคงเป็นน้ำจืด ความสัมพันธ์นี้สามารถถูกใช้เพื่อประเมินความลึกตั้งแต่ชั้นน้ำจืดจนถึงน้ำเค็ม โดยใช้ความหนาของชั้นน้ำจืดที่อยู่เหนือระดับน้ำทะเลเป็นเกณฑ์ เรียกว่า Ghyben-Herzberg Relation (รูปที่ 2.10) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มที่อยู่ใต้ดินในชั้นน้ำบริเวณชายฝั่ง (Coastal aquifer) โดยตำแหน่งของรอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มจะเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของความหนาแน่นของน้ำจืดและน้ำเค็ม กล่าวได้ว่าความลึกของรอยต่อจะอยู่ใต้ระดับน้ำทะเลประมาณ 40 เท่าของความสูงของน้ำจืดที่อยู่เหนือระดับน้ำทะเล (X) หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า $Y = 40X$ (วินัย, 2540)

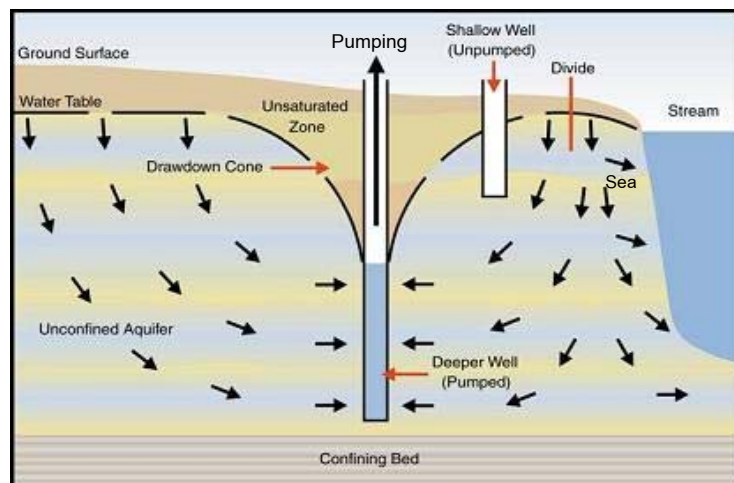


รูปที่ 2.9 Zone of dispersion (<http://water.usgs.gov/ogw/gwrp/saltwater/salt.html>)



รูปที่ 2.10 Ghyben-Herzberg Relation (www.solinst.com/Res/papers/101C4Salt.html)

เมื่อมีการเจาะบ่อบาดาลลงไปในพื้นที่ดิน และน้ำในบ่อบาดาลถูกสูบขึ้นมาใช้มากขึ้น ระดับน้ำในบริเวณใกล้เคียงจะลดลงต่ำลง ทำให้เกิด Drawdown cone ขึ้น (รูปที่ 2.11) โดยถ้าบริเวณนั้นมีน้ำเค็มอยู่ใต้ชั้นน้ำจืด ระดับของน้ำเค็มก็จะสูงขึ้นเรียกว่า Up-coning และก็ยังเป็นการรุกรานของน้ำเค็มอีกประเภทหนึ่งนอกเหนือจากประเภทแรกที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิด Drawdown cone (www.omafra.gov.on.ca)

หลักที่สำคัญต่อการรุกรานของน้ำเค็ม คือ ความดันในน้ำจืดเมื่อเทียบกับระดับน้ำทะเล ดังนั้นเพื่อป้องกันน้ำเค็มรุกรานเข้าสู่ชั้นน้ำจืดจึงจำเป็นต้องรักษาระดับความดันของน้ำจืดให้เพียงพอที่จะต้านทานการรุกรานของน้ำเค็ม ความเป็นไปได้ของการรุกรานของน้ำเค็มเข้าสู่ชั้นน้ำ

จัดสามารถประเมินได้โดยการวัดการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำ ซึ่งสามารถใช้วิธีการนี้เป็นเครื่องมือในการวางแผนเพื่อระวังการรุกคืบของน้ำเค็มได้ โดยชั้นน้ำที่มีการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำเหนือระดับน้ำทะเลอย่างมีนัยสำคัญ (แรงดันสูง) จะไม่มีความเสี่ยงต่อการรุกคืบของน้ำเค็ม ในขณะที่ชั้นน้ำที่มีระดับน้ำใกล้เคียงกับระดับน้ำทะเล (แรงดันต่ำ) จะมีความเสี่ยงมากกว่า นั่นหมายถึง หากมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณมาก ระดับน้ำบาดาลก็จะลดลงทำให้ความดันของน้ำจืดที่จะต้านการรุกคืบของน้ำเค็มก็ลดต่ำลง โอกาสที่น้ำเค็มจะรุกคืบเข้าสู่ น้ำบาดาลก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

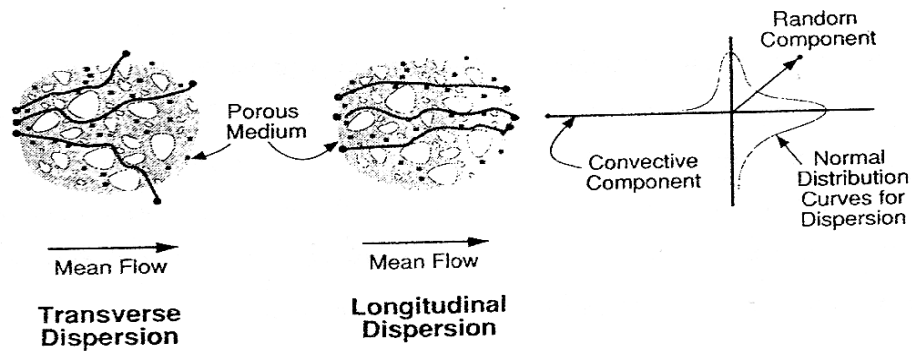
2.2.5 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินประกอบด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ คือ การเคลื่อนที่แบบการพา (Advection) การเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion) และการแพร่กระจายเชิงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic dispersion) (Moss, 1990)

a) การเคลื่อนที่แบบการพา (Advective Transport) เป็นกระบวนการที่สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการไหลซึมของน้ำอันเนื่องมาจากความแตกต่างของระดับน้ำ (Head) โดยผ่านไปตามรูพรุนของชั้นหินที่น้ำมีการไหลผ่าน ชั้นหินอุ้มน้ำที่มีค่าการซึมผ่านได้สูง เช่นทราย หรือกรวด จะมีการเคลื่อนที่แบบนี้ สารปนเปื้อนที่เป็นสารละลายแบบ Non-reactive ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับประจุลบในดินได้แก่ คลอไรด์ โดยจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยเท่ากับความเร็วในการไหลซึมของน้ำในดิน (Seepage velocity)

b) การเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion) เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนระหว่างจุดสองจุดในดินต่อหน่วยระยะทาง (Concentration gradient) โมเลกุลสารจะแพร่โดยไม่มี การไหลของน้ำ จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่ำ จนกว่าความเข้มข้นทั้งสองข้างเท่ากันจึงจะหยุดแพร่

c) การแพร่กระจายเชิงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic Dispersion) เป็นสภาพการไหลของน้ำใต้ดินแบบไม่คงตัว (Transient State) ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของสารละลายในน้ำใต้ดินเช่น สิ่งปนเปื้อนต่างๆ หรือ สารมลพิษ เป็นต้น ซึ่งมีทั้งการกระจายตัวในแนวทิศทางการไหล (Longitudinal dispersion) และการกระจายตัวในแนวทิศทางการตั้งฉากกับทิศทางการไหล (Transverse dispersion) (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 การแพร่กระจายเชิงอุทกพลศาสตร์ (Moss, 1990)

2.2.6 การประเมินศักยภาพแอ่งน้ำบาดาล

การประเมินศักยภาพแอ่งน้ำบาดาล มีจุดประสงค์หลักเพื่อศึกษาปริมาณการใช้น้ำที่ปลอดภัย (Safe yield) และปริมาณการใช้น้ำสูงสุดที่ยอมรับได้ (Allowable yield) โดย Sophocleous (1997) กล่าวว่า ปริมาณการใช้น้ำที่ปลอดภัย (Safe yield) หมายถึง ปริมาณน้ำที่สามารถนำมาใช้ในแอ่งน้ำนั้นๆ ได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบไม่ว่าทางตรงหรือทางอ้อมต่อแหล่งน้ำ คุณภาพน้ำ การทรุดตัวของแผ่นดินและอื่นๆ ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว หากมีการใช้น้ำที่มากเกินไปกว่าปริมาณน้ำปลอดภัยหรือภาวะที่อาจเกิดผลกระทบข้างเคียงที่ไม่พึงปรารถนาได้ เช่น ระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่สามารถสูบมาใช้ได้อีกต่อไป เป็นต้น สำหรับคำว่าปริมาณการใช้น้ำที่ปลอดภัย (Safe yield) เป็นคำที่มีความหมายค่อนข้างกว้างและมีความหมายใกล้เคียงกับคำอื่นเป็นจำนวนมากเช่น Permissible yield, Perennial yield เป็นต้น

ปริมาณการใช้น้ำสูงสุดที่ยอมรับได้ (Allowable yield) หมายถึง ปริมาณการใช้น้ำให้เกิดประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้สูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขของผลกระทบที่ยอมรับได้ ศักยภาพของแหล่งน้ำบาดาล โดยหลักการทั่วไปอาจพิจารณาจากปริมาณน้ำ ที่เติมให้กับชั้นน้ำในระยะเวลา แต่ต้องพิจารณาถึงอัตราการไหลของน้ำสู่ชั้นน้ำที่ต่อเนื่องกันและชั้นน้ำที่อยู่ทางท้ายน้ำด้วย (Stephen et al, 2000)

ปริมาณน้ำที่ยอมให้สูบได้ (Permissible yield) คือปริมาณน้ำที่สามารถสูบขึ้นมาใช้ได้จากการพิจารณาในเรื่องผลประโยชน์ที่จะได้รับกับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในพื้นที่นั้นและได้ใช้น้ำใต้ดิน (Water Balance Research Group, 1976)

สุจริต และ โชคชัย, (2551) เสนอแนวทางการประเมินศักยภาพสามารถสรุปได้เป็น 3 แนวทางหลัก คือ การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลโดย 1) การคำนวณศักยภาพโดยพิจารณาปริมาณกักเก็บน้ำบาดาล (งบคูลน้ำ) 2) การคำนวณศักยภาพจากการคืนตัวของระดับน้ำ และ 3) การประเมินศักยภาพโดยใช้แบบจำลองน้ำบาดาล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การคำนวณศักยภาพโดยพิจารณาจากงบคูลน้ำ

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลวิธีนี้ คำนึงถึงปริมาณน้ำบาดาลที่กักเก็บไว้ในแอ่งน้ำบาดาลที่ไม่ให้มีการลดลงของปริมาณน้ำบาดาลลงไปอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือพิจารณาถึงสถานะสมดุลของปริมาณน้ำในแอ่งน้ำบาดาลดังสมการที่ 2-8

$$\begin{aligned} \text{การเปลี่ยนแปลงปริมาณที่กักเก็บ} = & \text{ปริมาณการเติมน้ำเข้าสู่แอ่งน้ำ} + \text{ปริมาณน้ำไหลออกจาก} \\ & \text{แอ่งน้ำ} + \text{ปริมาณน้ำไหลเข้าแอ่ง} - \text{ปริมาณน้ำที่ถูกสูบ} \\ & \text{ใช้} \end{aligned} \quad (2-8)$$

วิธีนี้คำนึงถึงปริมาณน้ำไหลเข้า และปริมาณน้ำไหลออกจากแอ่งน้ำบาดาลทั้งหมดในรอบปี นั่นคือรักษาสมดุลของแอ่งน้ำบาดาลโดยให้ปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณน้ำไหลออก หรือปริมาณที่สูบขึ้นมาใช้มีค่าเท่าๆ กัน ปริมาณที่สูบขึ้นมาใช้นี้คือศักยภาพของแอ่งน้ำบาดาล หากปริมาณน้ำไหลเข้ามากเพียงพอต่อปริมาณการใช้น้ำบาดาล ปริมาณน้ำกักเก็บจะไม่ลดลงไป ซึ่งถือว่าแอ่งน้ำบาดาลยังมีศักยภาพสามารถให้น้ำบาดาล

2) การคำนวณศักยภาพจากการคืนตัวของระดับน้ำ

สำหรับการศึกษาดังวิธีนี้ได้คำนวณศักยภาพน้ำบาดาลเบื้องต้นจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในรอบปี พื้นที่ของแหล่งน้ำบาดาล และปริมาณน้ำจำเพาะ (Specific storage) ในกรณีของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดัน (Unconfined aquifers) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักน้ำ (Storage coefficient) แทนปริมาณน้ำจำเพาะ แสดงดังสมการที่ 2-9

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำที่เก็บกัก} = & \text{การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ} \times \text{พื้นที่ของชั้นน้ำ} \times \text{สัมประสิทธิ์ของ} \\ & \text{การเก็บกักน้ำ} \end{aligned} \quad (2-9)$$

3) การประเมินศักยภาพโดยใช้แบบจำลองน้ำบาดาล

วิธีการประเมินศักยภาพโดยใช้แบบจำลองนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสภาพของน้ำบาดาล มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพของปริมาณฝน ปริมาณการใช้น้ำและปัจจัยอื่นๆ ดังนั้นการนำเอาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเหล่านี้มาพิจารณา โดยอาศัยแบบจำลองน้ำบาดาล ทำให้การประเมินมีความแม่นยำขึ้น และสามารถประเมินศักยภาพในแต่ละชั้นน้ำภายใต้ภาวะเงื่อนไขต่างๆ ได้ด้วย

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Models)

แบบจำลองน้ำบาดาล เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการศึกษาและประเมินสภาพที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติหรือจำลอง (Simulate) พฤติกรรมของกระบวนการที่เกิดขึ้น เพื่อใช้ทำนายหรือพยากรณ์ เหตุการณ์ที่ยังไม่เกิดขึ้น แบบจำลองน้ำบาดาล แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แบบจำลองทางกายภาพ (Physical model) ใช้ในการจำลองการไหลของน้ำในกรณีต่างๆ โดยการควบคุมตัวแปรทางชลศาสตร์สามารถตรวจสอบผลได้จากแบบจำลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ใช้คำนวณทิศทาง ขนาดการไหลของน้ำบาดาล และการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำใต้ดิน โดยนำวิธีการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้คำนวณและวิเคราะห์ระบบน้ำบาดาลแทนแบบจำลองทางกายภาพ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มี 2 ประเภท คือ แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (Analytical model) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical model) ซึ่งการใช้งานจะขึ้นอยู่กับลักษณะความซับซ้อนของสภาวะเริ่มต้น (Initial condition) กล่าวคือแบบจำลองเชิงวิเคราะห์มักจะใช้กับชั้นน้ำที่มีระบบไม่ซับซ้อนหรือชั้นน้ำมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด โดยสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อวิเคราะห์หาผลเฉลย โดยทั่วไปแบบจำลองเชิงวิเคราะห์นี้จะใช้สำหรับออกแบบและคำนวณเบื้องต้น หรือตรวจสอบแบบจำลองเชิงตัวเลข แต่ในสภาพความเป็นจริงมีความซับซ้อน เช่น ดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งพื้นที่ ลักษณะการไหลไม่ได้ไปในทิศทางเดียวกัน ความเร็วในการไหลก็แตกต่างกัน

ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตและค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในสมการจึงมีความแตกต่างกัน จึงต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นทุกจุดในแต่ละช่วงเวลาและพื้นที่ (Time and space) แตกต่างกันไป จากนั้นทำการประมาณค่าโดยใช้ชุดสมการอนุพันธ์ย่อยแบบต่อเนื่อง เรียกว่าแบบจำลอง

เชิงตัวเลข ซึ่งจะใช้ในกรณีที่ระบบชั้นน้ำมีความซับซ้อนและแบ่งออกเป็นชั้นๆ วิธีการนี้พื้นที่ของชั้นน้ำจะถูกแบ่งออกเป็นตารางย่อยๆ จำนวนมากโดยแบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมในกรณีใช้วิธี Finite difference และรูปสามเหลี่ยมหรือรูปสี่เหลี่ยมในกรณีใช้วิธี Finite-element ช่วงเวลาที่จะถูกแบ่งออกเป็นช่วงเวลาย่อยๆ โดยมีสมการพีชคณิต (Algebra) หรือชุดสมการของตัวมันเอง จากนั้นแก้สมการโดยใช้วิธีทางเมตริก (Matrix method) เนื่องจากวิธีการนี้ใช้ระบบสมการที่ซับซ้อน ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์จึงเป็นเครื่องมือที่ลดความยุ่งยากและเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการคำนวณ (Domenico and Schwartz, 1998)

อย่างไรก็ดีการสร้างแบบจำลองให้สมบูรณ์เหมือนสภาพจริงนั้นไม่สามารถทำได้ หากไม่มีการสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของสภาพพื้นที่ เพื่อช่วยทำให้ระบบมีความง่ายและจัดระบบของข้อมูลที่เกี่ยวข้องให้อยู่ในรูปที่พร้อมจะวิเคราะห์ได้ ถ้าแบบจำลองเชิงมโนทัศน์มีความใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติมากเท่าไร ความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขก็จะเพิ่มมากขึ้น

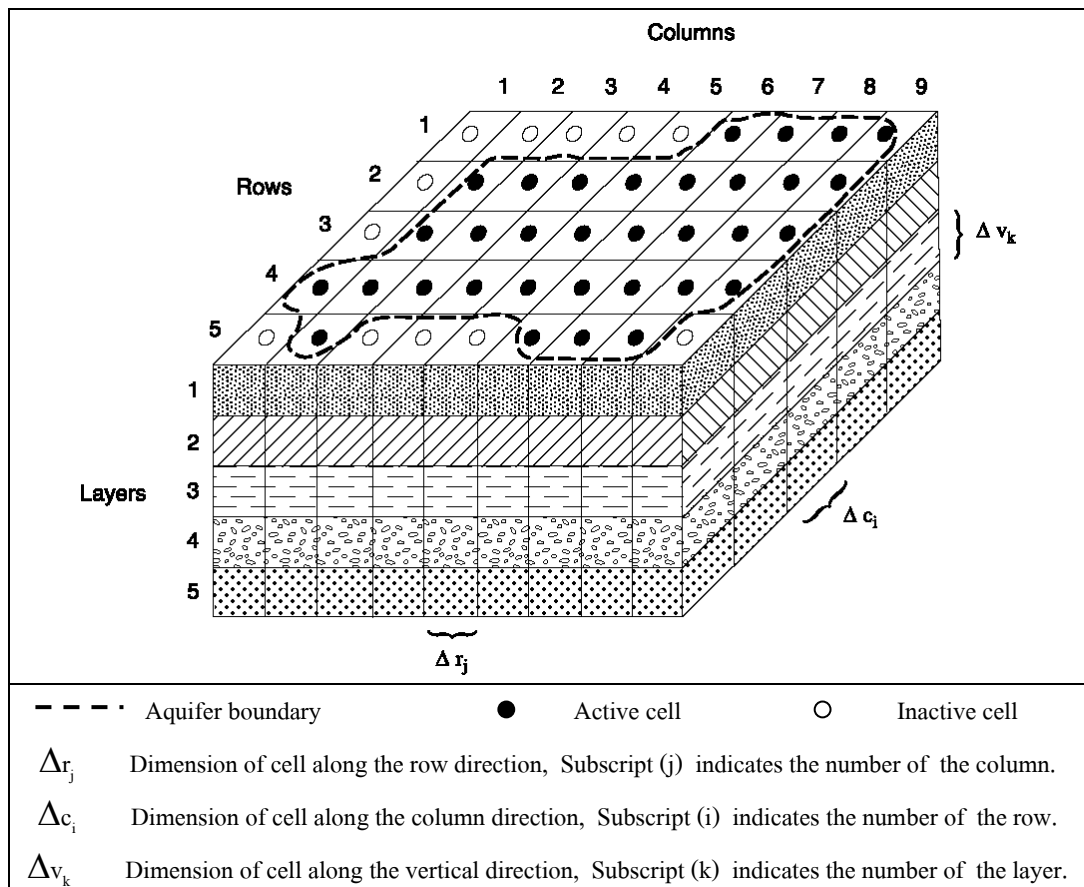
2.3.1 โปรแกรม Visual MODFLOW (V.4.1 Pro)

การเลือกใช้โปรแกรมสำหรับแบบจำลองซึ่งมีอยู่หลายโปรแกรมขึ้นกับวัตถุประสงค์และปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความถูกต้องในการคำนวณ ประสิทธิภาพ รวมถึงค่าใช้จ่ายต่างๆ เป็นต้น การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Visual MODFLOW (Version 4.1 Pro) พัฒนาโดย Waterloo Hydrogeologic Inc. ประเทศแคนาดา เป็นโปรแกรมในตระกูล MODFLOW (MODular three-dimensional finite difference groundwater FLOW model) เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการคำนวณการไหลของน้ำใต้ดินในระบบ 3 มิติ สามารถประยุกต์แบบจำลองเข้ากับปัญหาได้ง่ายและไม่ยุ่งยากซับซ้อน ใช้การคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ในรูปแบบผลต่างเชิงอนุพันธ์ (Finite difference) (รูปที่ 2.13) ซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ใน Visual MODFLOW (V 4.1Pro) ประกอบด้วยโปรแกรมย่อยต่างๆ เช่น MODFLOW-2000, MODPATH, MT3DMS, RT3D, WinPEST และ SEAWAT เป็นต้น โดย MODFLOW-2000 จะถูกใช้เป็นโปรแกรมหลักในการคำนวณอัตราการไหลของน้ำใต้ดินร่วมกับระบบอุทกวิทยา แสดงผลของทิศทางการไหลในแนวหลัก (Strongest hydraulic gradient direction) ส่วนโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์และคำนวณการแพร่กระจายของมวลสาร ได้แก่ โปรแกรม MT3D, MT3DMS เป็นต้น

2.3.2 โปรแกรม SEAWAT

SEAWAT เป็น Module ย่อยหนึ่งใน Visual MODFLOW มีลักษณะพิเศษคือ เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นในจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของมวลสารในระบบ 3 มิติ เหมาะสำหรับการจำลองการรุกคืบของน้ำเค็ม (Seawater intrusion) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์แนวเชื่อมต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็ม (Transitional zone) เมื่อเกิดการแพร่กระจาย (Dispersion) จากน้ำเค็มสู่น้ำจืด การพัฒนา SEAWAT เริ่มจาก Guo and Bennett (1998) เป็นการรวมระหว่างโปรแกรม MODFLOW กับ MT3D เข้าด้วยกัน ต่อมา U.S. Geological Survey ได้มีการพัฒนาต่อโดย Guo et al. (2001) โดยรวมระหว่างโปรแกรม MODFLOW กับ MT3DMS (Multi-Species Mass Transport 3D Model) เข้าด้วยกัน ทำให้การวิเคราะห์ปัญหาที่มีความสะดวก รวดเร็วและง่ายขึ้น ลักษณะการทำงานของ SEAWAT ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (Guo and Langevin, 2002)

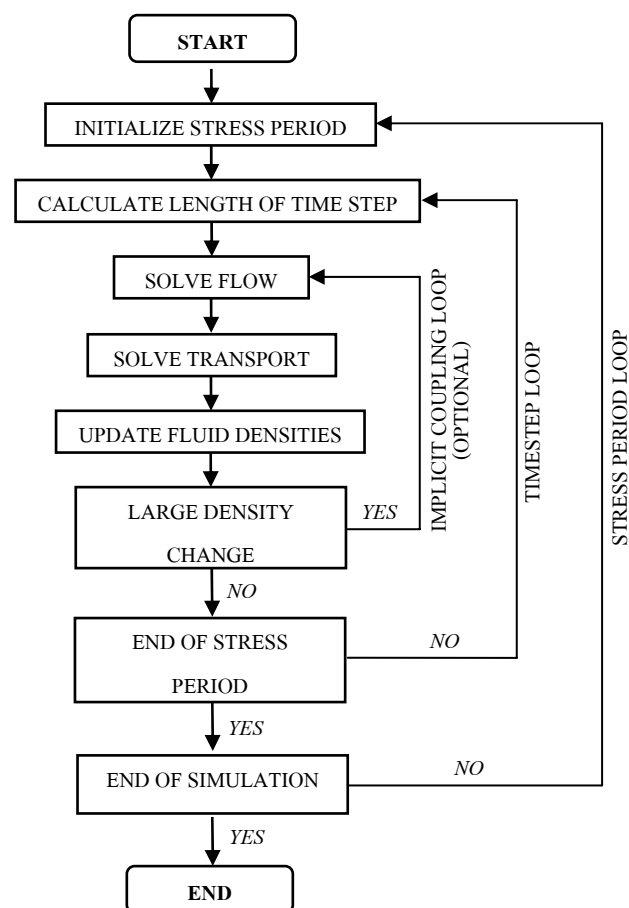


รูปที่ 2.13 ลักษณะการแบ่งพื้นที่ในการคำนวณโดยวิธี Finite difference ใน MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)

2.3.3 สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ใน Visual MODFLOW

2.3.3-1 สมการการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow Equation)

แบบจำลองเชิงตัวเลขได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจำลองการไหลน้ำใต้ดิน โดยใช้สมการหลัก 2 สมการ คือ สมการสมมูล (Continuity equation) และกฎของดาร์ซี (Darcy' law) (Fetter, 1994) เพื่อประยุกต์ให้ได้สมการการไหลทั่วไปของน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ (Constant density) ผ่านตัวกลางซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Heterogeneous และ Anisotropic ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient conditions) ดังสมการที่ (2-10) (ดูรายละเอียดที่มาของสมการ ในภาคผนวก จ-1)



รูปที่ 2.14 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม SEAWAT ใน MODFLOW (จาก Guo and Langevin, 2002)

$$\frac{\partial}{\partial x}[-K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[-K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z}[-K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z}] + R = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-10)$$

เมื่อ	K_x, K_y, K_z	=	ค่าความนำหลศาสตร์ในแนว x, y, z ตามลำดับ [LT^{-1}]
	h	=	ความสูงของระดับความดันน้ำ [L]
	S_s	=	ปริมาณการกักเก็บจำเพาะ (Specific storage) [L^{-1}]
	R	=	ปริมาณน้ำเข้า (Recharge) และ/หรือ ออก (Discharge) จากระบบต่อหน่วยปริมาตรของชั้นน้ำต่อหน่วยเวลาที่น้ำเข้าและ/หรือ ออก [T^{-1}] (กรณีจำลองการไหลออก R มีค่าเป็นลบ)
	t	=	เวลา [T]

2.3.3-2 สมการการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำใต้ดิน (Mass Transport Equation)

การคำนวณและการจำลองการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำใต้ดิน ขึ้นอยู่กับการจำลองการไหลของน้ำเป็นหลัก แล้วอาศัยลักษณะการพา (Advection) การแพร่และการกระจาย (Dispersion and diffusion) และปฏิกิริยา (Reaction) ของมวลสารเข้ามารวม ดังนั้นความเข้มข้นของมวลสารที่เคลื่อนที่ได้ในเวลาที่ต่าง ๆ ใน 1 มิติ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-11) (Zheng and Wang, 1999)

$$\frac{\partial(nC^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[nD_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial X_j} \right] - \frac{\partial}{\partial X_i} (nV_i C^k) + q_s C_s^k + \sum_{n=1}^N R_n \quad (2-11)$$

เมื่อ	C^k	=	ความเข้มข้นของมวลสาร k ที่ละลายในน้ำ [ML^{-3}]
	n	=	ความพรุนของวัตถุตัวกลาง [ไม่มีหน่วย]
	t	=	เวลา [T]
	X_i	=	ระยะทางการเคลื่อนที่ [L]
	D_{ij}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Hydrodynamic dispersion coefficient) [L^2T^{-1}]
	V_i	=	ความเร็วจริงเฉลี่ยของน้ำใต้ดิน (Linear pore water velocity) [LT^{-1}]
	q_s	=	อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้า (Source, +) หรือไหลออก (Sink, -) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของชั้นหินอุ้มน้ำ [T^{-1}]

$$C_s^k = \text{ความเข้มข้นของมวลสาร } k \text{ ณ จุดที่เข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดิน [ML}^{-3}\text{]}$$

$$R_n = \text{การเปลี่ยนแปลงมวลสาร } k \text{ ต่อหน่วยเวลาขณะที่มีการเคลื่อนที่ที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดจากมวลดินกับมวลสารในน้ำ [ML}^{-3}\text{T}^{-1}\text{]}$$

สมการที่ (2-11) เป็นสมการสมดุลของมวลสาร หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของมวลสารในแต่ละหน่วยเวลา จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของมวลสารจากการแพร่กระจาย ลบด้วยอัตราการพามวลสารจากจุดนั้น บวกด้วยการเพิ่มเติมมวลสารเข้าไปในระบบหรือลบด้วยการไหลออกของมวลสารจากระบบ และรวมกับปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ที่มีผลทำให้มวลสารลดหรือเพิ่มปริมาณ หน่วงหรือเร่งความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยสามารถแบ่งย่อยๆ ตามลักษณะของการเคลื่อนที่ได้ดังนี้ (ดูรายละเอียดสมการในภาคผนวก จ-2)

$\frac{\partial(nC^k)}{\partial t}$	หมายถึง	อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารในระบบของแต่ละช่วงเวลา (Change in storage)
$\frac{\partial}{\partial X_i} \left[nD_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial X_j} \right]$	หมายถึง	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารอันเนื่องจากการแพร่กระจาย (Dispersion and diffusion)
$-\frac{\partial}{\partial X_i} (nV_i C^k)$	หมายถึง	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารอันเนื่องจากการพา (Advection in/outflow)
$q_s C_s^k$	หมายถึง	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารอันเนื่องจากการไหลเข้าหรือออกของมวลสาร (Source/sink)
$\sum_{n=1}^N R_n$	หมายถึง	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารอันเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction)

2.3.4 Variable Density Equation

สมการการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของมวลสาร กรณีที่ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของน้ำจืดและน้ำเค็ม (Variable density) มีผลต่อการจำลองนั้นซึ่งถูกใช้ใน SEAWAT สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-12) ดังนี้ (Guo and Langevin, 2002) (ดูรายละเอียดที่มาของสมการ ในภาคผนวก จ-3)

1) Governing Equation for Variable Density Flow

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho K_{fx} \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho K_{fy} \left(\frac{\partial h_f}{\partial y} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial y} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_{fz} \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \right] = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + nE \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \end{aligned} \quad (2-12)$$

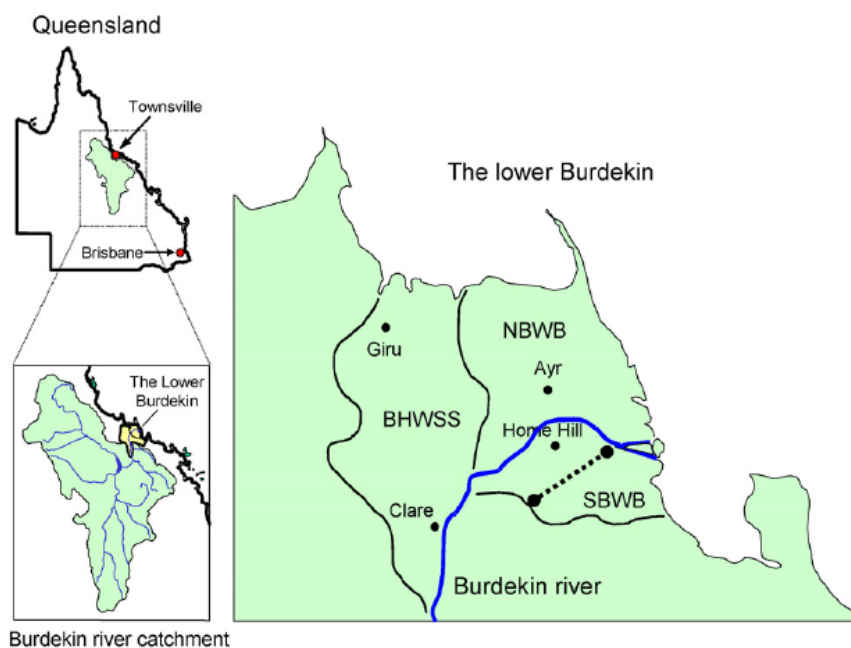
- เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของมวลสาร (Fluid density) [ML⁻³]
 ρ_f = ความหนาแน่นของน้ำจืด (Density of freshwater) [ML⁻³]
 $\bar{\rho}$ = ความหนาแน่นของน้ำที่ไหลเข้า (Source, +) หรือไหลออก (Sink, -)
 h_f = ระดับแรงดันน้ำจืด (Equivalent freshwater head) [L]
 S_f = ปริมาณการกักเก็บจำเพาะ (Specific storage) [L⁻¹]
 K_{fx}, K_{fy}, K_{fz} = ค่าความนำชลศาสตร์ (Freshwater hydraulic conductivity) ในแนว x, y, z ตามลำดับ [LT⁻¹]
 n = ความพรุนของวัตถุตัวกลาง (Porosity) [ไม่มีหน่วย]
 t = เวลา (Time) [T]
 q_s = อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้า (Source, +) หรือไหลออก (Sink, -) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของชั้นหินอุ้มน้ำ [T⁻¹]
 E = ความชัน ($\frac{\partial \rho}{\partial C}$) (มีค่าประมาณ 0.7143), (Baxter and Wallace, 1916)
 $\frac{\partial C}{\partial t}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมวลสารต่อหน่วยเวลา

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 การจำลองการรุกของน้ำเค็มใน North Queensland, Australia (Narayan et al., 2007)

การศึกษาการรุกของน้ำเค็มบริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำ (Berdenskin) ในออสเตรเลีย (รูปที่ 2.15) โดยจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำเค็มให้แปรผันตามความหนาแน่น (Variable Density) โดยใช้โปรแกรม SUTRA ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการไหลน้ำใต้ดินแบบ 2 มิติ จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองพบว่าอัตราการสูบน้ำ และการเพิ่มเติมน้ำสู่ชั้นหินให้น้ำ มี

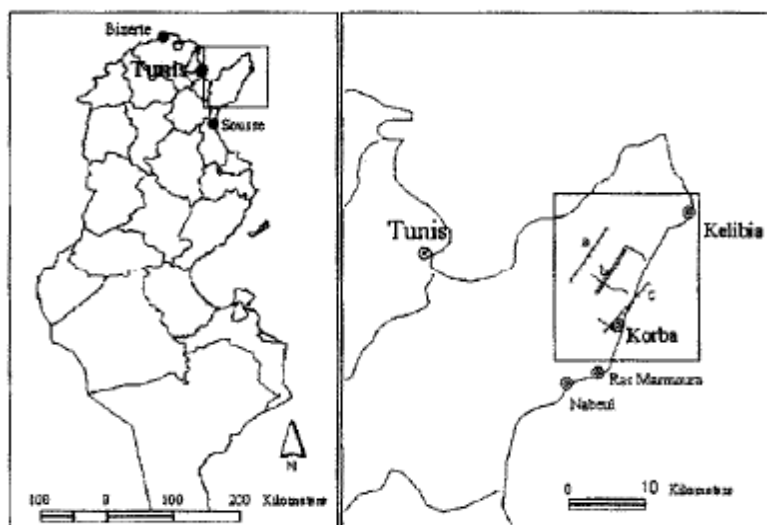
ผลต่อแบบจำลองมากกว่าคุณสมบัติของชั้นหินให้น้ำเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน(Hydraulic conductivity)เป็นต้น และจากการวิเคราะห์ผลของน้ำจืด-น้ำลจริมฝั่งทะเลพบว่ามืผลต่อการรุกค้ำของน้ำเค็มน้อยมากสามารถตัดออกได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่เกิดจากการสูบน้ำใต้ดิน



รูปที่ 2.15 แผนที่บริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำในออสเตรเลีย (Narayan et al., 2007)

2.4.2 การจำลองการรุกของน้ำเค็มใน Korba Coastal (Tunisia Paniconi et al., 2000)

ได้การศึกษาการรุกของน้ำเค็มบริเวณที่ราบลุ่มชายฝั่งทะเล Korba ประเทศตูนิเซีย โดยจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำเค็มให้แปรผันตามความหนาแน่น (Variable Density) โดยใช้โปรแกรม CODESA-3D (COupled variable DEnsity and SATuration) ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการไหลน้ำใต้ดินแบบ 3 มิติ โดยใช้ผลจากการสูบน้ำ (Pumping) การเพิ่มน้ำ(Recharge) คุณสมบัติดินและชั้นน้ำ(Soil /aquifer properties) และชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ(Unsaturated zone) มาวิเคราะห์ โดยรวบรวมข้อมูลต่างๆ จากการติดตามและเฝ้าระวังเป็นเวลา 35 ปี (1962-1996) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลอง แล้วจำลองการสูบน้ำที่ 25 ปี พบว่าต้องใช้อัตราสูบน้ำไม่เกิน 3×10^6 m³/yr. (สูบน้ำทดสอบจำนวน 10 บ่อ) จึงจะไม่ทำให้เกิดการรุกค้ำของน้ำเค็ม



รูปที่ 2.16 แผนที่ของที่ราบลุ่มชายฝั่งทะเล Korba ประเทศตูนิเซีย (Paniconi et al., 2000)

2.4.3 การจำลองการรุกของน้ำเค็มใน East Central Florida, USA Guvanasen (et al., 2003)

ได้การศึกษาการรุกของน้ำเค็มบริเวณฝั่งตะวันออกกลางของรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกาโดยจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำเค็มให้แปรผันตามความหนาแน่น (Variable Density) โดยใช้โปรแกรม MODFLOW ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการไหลน้ำใต้ดินแบบ 3 มิติ โดยจำลองการเพิ่มของอัตราการสูบน้ำที่ 25 ปี (1995-2020) พบว่าในปี 2020 ระยะน้ำลด (Drawdown) จากการจำลองมีค่าประมาณ 6-10 ฟุต ส่วนปริมาณคลอไรด์มีค่าถึง 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นระยะทางประมาณ 0.5-1.0 ไมล์ จากชายฝั่ง ส่วนการปรับเทียบและการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อแบบจำลองมากที่สุดได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ขอบเขตชั้นน้ำบาดาล (General-head boundary) และค่าความนำชลศาสตร์ (Conductance) ตามลำดับ

2.4.4 การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของน้ำบาดาลแอ่งหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (อมรรัตน์, 2548)

ได้ทำการศึกษาการไหลและสมดุลแหล่งน้ำบาดาลของแอ่งหาดใหญ่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW Version 2.81 รายละเอียดของผลการศึกษา มีดังนี้

พื้นที่ศึกษาครอบคลุมพื้นที่จากพิกัด UTM 640000-675000E ตามแนวตะวันออก-ตะวันตก มีความกว้าง 35 กิโลเมตร จากพิกัด UTM 720000-795000N ตามแนวเหนือ-ใต้ มีความยาว 75 กิโลเมตร (สิ้นสุดที่ชายแดนไทย-มาเลเซีย) การจำลองระบบอุทกธรณีวิทยา มีสมมติฐานดังนี้

- 1) ความหนาแน่นของน้ำคงที่ (Constant density)
- 2) ชั้นหินอุ้มน้ำ แต่ละชั้นมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีความสมบัติทางศาสตร์เปลี่ยนแปลงตามทิศทาง (Anisotropic)
- 3) ชั้นหินให้น้ำที่เป็นหินแข็งรองรับแอ่ง มีการกักเก็บน้ำในรอยแตก รอยแยก และรอยต่อของหิน

ผลการจำลองการไหลพบว่า น้ำบาดาลแอ่งหาดใหญ่ไหลจากขอบแอ่งด้านทิศตะวันออก ทิศตะวันตกและทิศใต้ สู่ที่ราบตอนกลางของแอ่ง บริเวณอำเภอหาดใหญ่ แล้วไหลไปทางทิศเหนือสู่ทะเลสาบสงขลา ผลการประเมินสมดุลของน้ำบาดาลพบว่าปริมาณน้ำไหลเข้าแอ่งกักเก็บทั้งหมด 269.25 ล้านลบ.ม./ปี ประกอบด้วย น้ำที่กักเก็บอยู่ในชั้นหินให้น้ำ 136.82 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี, การเพิ่มเติมน้ำสุทธิจากน้ำฝน 120.39 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี, น้ำจากชั้นหินให้น้ำของน้ำบาดาลในหินแข็ง (เทือกเขาด้านตะวันออก-ตะวันตก) 10.46 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และการไหลซึมของน้ำจากคลองรัตภูมิและคลองอู่ตะเภา 1.59 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนปริมาณน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลอง ไหลออกไปกักเก็บในชั้นหินให้น้ำ 131.63 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี, คลองรัตภูมิและคลองอู่ตะเภา 108.64 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี, บ่อบาดาลที่มีการสูบน้ำ 16.55 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี, ทะเลสาบสงขลา 12.13 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปีและชั้นหินให้น้ำของน้ำบาดาลในหินแข็ง 0.31 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณน้ำไหลออกจากแบบจำลองทั้งหมด 269.25 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี การเพิ่มอัตราการสูบน้ำในเหตุการณ์สมมติมากกว่า 3 เท่าของการใช้น้ำปี พ.ศ. 2543 (49.66 ล้านลบ.ม./ปี) ส่งผลให้ระดับน้ำบาดาลลดลงมากกว่า 2 เมตร ซึ่งเกินเกณฑ์ที่อมรรัตน์ได้กำหนดไว้

2.4.5 การศึกษาการรุกของน้ำเค็มในชั้นน้ำใต้ดินในแอ่งหาดใหญ่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (อรุณ, 2552)

ได้ทำการศึกษาการไหลและการรุกของน้ำเค็มในแอ่งหาดใหญ่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW Version 4.1 รายละเอียดของผลการศึกษามีดังนี้

พื้นที่ศึกษา ตั้งอยู่ระหว่างพิกัด UTM 640000-670000E UTM 750000-810000N วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ มีความยาว 60 กิโลเมตรความกว้างประมาณ 20 กิโลเมตร และมีความลึกมากที่สุด 1 กิโลเมตร คิดเป็นพื้นที่ประมาณ 1,200 ตารางกิโลเมตร การจำลองระบบอุทกธรณีวิทยา มีสมมติฐานเช่นเดียวกับ อมรรัตน์ (2548)

ผลการจำลองการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าการไหลของน้ำบาดาลมีทิศการไหลจากพื้นที่เติมน้ำทิศตะวันออก ทิศตะวันตกและทิศใต้ ไปยังที่ราบตอนกลางของพื้นที่ แล้วไหลออกสู่ทะเลสาบสงขลา ผลการศึกษาสมมูลน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2550 พบว่า ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่แบบจำลองมาจากการเติมน้ำจากชั้นหินอุ้มน้ำของน้ำบาดาลในหินแข็ง (เทือกเขาด้านตะวันออก-ตะวันตก) 53.40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี การเพิ่มเติมน้ำสุทธิจากน้ำฝน 28.20 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ปริมาณน้ำที่กักเก็บอยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำ 23.96 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี มีการไหลซึมของน้ำจากคลองรัตภูมิและคลองอู่ตะเภาเข้าสู่แบบจำลอง 7.72 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และจากทะเลสาบสงขลา 1.72 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณน้ำไหลเข้าระบบทั้งหมด 115.00 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนปริมาณน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองไหลออกไปกักเก็บในชั้นหินอุ้มน้ำ 66.88 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ออกจากบ่อบาดาลที่มีการสูบน้ำ 25.03 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี คลองรัตภูมิและคลองอู่ตะเภา 10.20 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ทะเลสาบสงขลา 7.83 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และหินแข็ง 5.06 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณน้ำไหลออกจากแบบจำลองทั้งหมด 115.00 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ต่างจากอมรรัตน์ที่ได้ประเมินไว้ที่ 269.25 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ผลจากการจำลองการรุกคืบของน้ำเค็มพบว่า ในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบันบริเวณที่มีการกระจายตัวของคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐานถูกจำกัดขอบเขตอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลา และริมทะเลอ่าวไทยของชั้นน้ำบาดใหญ่ ได้แก่ บริเวณบ้านใต้ บ้านหนองหิน บ้านควน บ้านบางโหนด บ้านดีหลวงนอก เป็นต้น มีขอบเขตความเค็มคิดเป็นระยะทางตามแนวเหนือ-ใต้ประมาณ 7.50 กิโลเมตร จากทะเลสาบสงขลาและอยู่ห่างจากเมืองหาดใหญ่ประมาณ 8 กิโลเมตร โดยพื้นที่นี้ ได้แก่ ต.บ้านหาร อ.บางกล่ำ ต.คลองแหและ ต.คลองอู่ตะเภา อ.หาดใหญ่ ซึ่งถือได้ว่าเป็นพื้นที่กันชน (Buffer zone) ส่วนชั้นน้ำคูเต่าและคอหงส์พบว่าปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี ส่วนผลการจำลองกรณีกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่พบว่า การเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงเข้าสู่เขตเทศบาลหาดใหญ่เกิดขึ้นน้อยเนื่องจากยังมีทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินไปสู่ทะเลสาบสงขลา

ผลการจำลองเพื่อประเมินปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำบาดาล (Safe yield) พบว่า ในสถานการณ์ใช้น้ำปัจจุบันหากมีอัตราการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% และ 10% ในช่วง 20 ปีข้างหน้า (พ.ศ.2569) จะส่งผลให้ระดับน้ำลดลงมากกว่า 5 เมตร ภายใน 8 ปี และ 6 ปี ตามลำดับ ส่วนการรुकูล้ำของน้ำเค็มพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้เมืองหาดใหญ่มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นยังไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงกำหนดปริมาณใช้น้ำปลอดภัยของแอ่งหาคใหญ่เท่ากับ 36 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือประมาณ 98,630 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

บทที่ 3

งานรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ

การรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ประกอบด้วย ข้อมูลภูมิศาสตร์ ข้อมูลด้านอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลบ่อน้ำบาดาล และข้อมูลการใช้น้ำบาดาลโดยมีรายละเอียดข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาจัดทำระบบฐานข้อมูลโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ด้วยโปรแกรม ArcView และสรุปข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย 1) การจัดทำภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา 2) การประเมินอัตราการเพิ่มเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาล และ 3) การประเมินอัตราการใช้น้ำบาดาล ดังมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ

ข้อมูล	ลักษณะข้อมูล	แหล่งข้อมูล
ภูมิประเทศ	แผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1 : 50,000	กรมแผนที่ทหาร
ธรณีวิทยา	แผนที่ธรณีวิทยา มาตรฐาน 1 : 250,000	กรมทรัพยากรธรณี
อุทกธรณีวิทยา	แผนที่อุทกธรณีวิทยา มาตรฐาน 1 : 100,000	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
บ่อน้ำบาดาล	ข้อมูลทางชลศาสตร์ ข้อมูลชั้นดินและหิน	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
ปริมาณน้ำฝน	ปริมาณน้ำฝนรายเดือน	กรมอุตุนิยมวิทยาและ กรมชลประทาน
การใช้ประโยชน์ที่ดิน	แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. 2543	กรมพัฒนาที่ดิน
การคายระเหย	ข้อมูลการคายระเหยของพืชและน้ำผิวดิน	กรมพัฒนาที่ดิน
ประชากร	ข้อมูลประชากรในรูปตารางและสถิติ	กรมการปกครอง

3.1 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา

การจัดทำภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยามีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงลักษณะขอบเขตความลึก การวางตัวของชั้นน้ำบาดาลและชนิดชั้นน้ำในพื้นที่ศึกษา โดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. การเตรียมข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหิน (Lithology) ประกอบด้วย

1.1) เตรียมข้อมูลบ่อบาดาล (จากฐานข้อมูลกรมทรัพยากรน้ำบาดาล) ซึ่งประกอบด้วย ชื่อ บ่อ (Well no), สถานที่ (Location), พิกัดบ่อ (Coordinate), ค่าระดับปากบ่อ (Elevation) ความลึกบ่อ (Depth), ระยะท่อกรอง (Screen) เป็นต้น

1.2) คัดเลือกบ่อที่มีข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหิน (Lithology) แล้วนำมาพล็อตในแผนที่เพื่อดูการกระจายตัวของบ่อบาดาล เพื่อนำไปสู่การกำหนดแนวภาพตัดขวาง

1.3) กำหนดแนวภาพตัดขวางทั้งหมดในพื้นที่ คือ แนวตะวันออก-ตะวันตก จำนวน 2 แนว และแนวเหนือ-ใต้ จำนวน 1 แนว

1.4) คัดเลือกบ่อบาดาลในแต่ละภาพตัดขวาง และทำการคัดแยกข้อมูลเพื่อจัดทำเป็นฐานข้อมูล

1.5) ปรับความลึกบ่อบาดาลให้อยู่ในหน่วยของระดับน้ำทะเลปานกลาง

1.6) ลากเส้นระดับผิวดินของแต่ละแนวภาพตัดขวาง

1.7) ใส่ข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหิน (Lithology) ของแต่ละบ่อลงในภาพตัดขวาง ซึ่งประกอบด้วย ความลึกบ่อ ท่อกรอง และชนิดชั้นดิน-ชั้นหิน

2. การวิเคราะห์แบ่งชั้นน้ำบาดาล

2.1) วิเคราะห์แบ่งชั้นน้ำบาดาลจากชนิดชั้นดิน-ชั้นหินเช่น ดินเหนียว (Clay) ทราย (Sand) หรือกรวด (Gravel) แล้วลากเส้นแบ่งชั้นน้ำของแต่ละแนวภาพตัดขวาง

2.2) กำหนดชื่อชั้นหินอุ้มน้ำและชั้นกั้นน้ำ

จากการรวบรวมข้อมูลบ่อบาดาลทั้งหมดในพื้นที่ศึกษาจำนวน 25 บ่อ (แสดงในภาคผนวก ก) แล้วคัดเลือกรบ่อที่มีข้อมูลชั้นดินชั้นหิน (Lithology) ได้จำนวน 15 บ่อ ซึ่งกระจายทั่วพื้นที่ (ตารางที่ 3.2) บ่อบาดาลเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการทำภาพตัดขวางทางอุทกธรณีจำนวน 3 ภาพ จำนวนบ่อบาดาลที่ใช้ในภาพตัดขวาง A-A', B-B', และ C-C' ได้แสดงในตารางที่ 3.3

การศึกษาภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาครั้งนี้เป็นการศึกษาแนวตัดขวางในแนว ตะวันออก – ตะวันตก จำนวน 2 แนว และ แนวตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ จำนวน 1 แนว โดยแสดงตำแหน่งแนวภาพตัดขวางในรูปที่ 3.1 จากการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้น ทำให้สามารถเขียนภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา สามารถสรุปคุณสมบัติของภาพตัดขวางได้ ดังนี้

1) แนว A-A' เป็นแนวตัดขวางตามแนวตะวันออก – ตะวันตก ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดย เริ่มจากทะเลสาบสงขลา พาดผ่านตัวอำเภอสงขลา มีความยาวของแนวประมาณ 1.95 กิโลเมตร ข้อมูลบ่อบาดาลที่ใช้จำนวน 6 บ่อ ได้แก่ บ่อ TH 0201, TH 0202, H0186-1, H 0186-2, TH 0318 และ H 0049

2) แนว B-B' เป็นแนวตัดขวางตามแนวตะวันออก – ตะวันตก ดังแสดงในรูปที่ 3.3 พาด ผ่านตัวอำเภอสงขลา มีความยาวของแนวประมาณ 2.25 กิโลเมตร ข้อมูลบ่อบาดาลที่ใช้จำนวน 2 บ่อ ได้แก่ บ่อ H 0043 และ H 0230

3) แนว C-C' เป็นแนวตัดขวางตามแนวตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ ดังแสดง ในรูปที่ 3.4 โดยเริ่มจากทะเลสาบสงขลา พาดผ่านตัวอำเภอสงขลา มีความยาวของแนวประมาณ 4.9 กิโลเมตร ข้อมูลบ่อบาดาลที่ใช้จำนวน 6 บ่อ ได้แก่ บ่อ H 0049, TH 0318, H 0186-1, H0186-2, H 0044 และ H3183

จากการรวบรวมและศึกษาข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหิน (Lithology) ข้อมูลธรณีวิทยา ข้อมูลอุทกธรณีวิทยาและภาพตัดขวางทั้ง 3 แนว (รูปที่ 3.2 - 3.4) สามารถแบ่งลักษณะชั้นน้ำใน เทศบาลนครสงขลาในเบื้องต้นได้เป็น 3 ชั้นน้ำ โดยชื่อของชั้นน้ำเหล่านี้เป็นการกำหนดขึ้นมาเพื่อ ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เท่านั้น ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.4 ได้แก่

ชั้นน้ำสมิหลา เป็นชั้นน้ำชั้นบนสุดซึ่งเป็นชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (Unconfined aquifer) มีความหนาเฉลี่ย 5 เมตร มีความลึกจากผิวดินลงไปจนถึง -5 ม. (รทก.) ดินชั้นนี้ ประกอบด้วย กรวดและทราย

ชั้นน้ำบ่อยาง เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดจากชั้นดินเหนียวซึ่งเป็นชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined aquifer) มีความหนาเฉลี่ย 20 เมตร มีความลึกตั้งแต่ -5 ม. ถึง -30 ม. (รทก.) ดินชั้นนี้ ประกอบด้วย กรวด และทรายปนดินเหนียว

ชั้นน้ำสงขลา เป็นชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined aquifer) มีความหนาเฉลี่ย 30 เมตร มีความลึกตั้งแต่ -30 ม. ถึง -70 ม. (รทก.) ชั้นดินนี้ประกอบด้วย กรวดและทราย

ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งบ่อบาดาลที่ใช้ในการศึกษา

wellno	utme	utmn	villname	depthdrill	depthdevel
H0043	676250	795550	โรงพยาบาลสงขลา	28.5	28.5
H0044	678656	793381	บ้านเก้าเส้ง	27	27
H0045	662121	779251	บริษัทไทยมารีนฟู๊ด	69	60
H0049	676550	796850	โรงเรียนมหาวิทยาลัยราชู	16.5	15
H0186	676550	796350	โรงเรียนวนารีย์เฉลิม	15	15
H0230	677650	794150	ค่ายรามคำแหง	12	6
H0237	668259	778257	ค่ายรามคำแหง	67.5	42
H0583	671210	798200	บ้านแม่ปรีอ	99	87
H1383	678753	793508	ร.พ.ประสาทสงขลา - บ่อยาง เมือง	27	12
TH0201	675953	796683	ทรัพยากรธรณี จ.สงขลา	27	26
TH0202	675994	796720	ทรัพยากรธรณี จ.สงขลา	27	27
TH0203	675014	797601	สถานีทหารเรือ(ฐานทัพเรือ)	54	50
TH0204	675002	797698	สถานีทหารเรือ(ฐานทัพเรือ)	45	45
TH0318	676579	796306	โรงเรียนวนารีย์เฉลิม	18	18
TH0409	676636	796430	หน้าศาลากลางจังหวัดสงขลา	30	30

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของแนวตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา (Cross Section)

แนวตัด	Section	พาดผ่าน	จำนวนบ่อ
แนวตะวันออก – ตะวันตก	A-A'	เทศบาลนครสงขลา	6
	B-B'	เทศบาลนครสงขลา	2
แนวตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้	C-C'	เทศบาลนครสงขลา	6
		รวม	14

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา

ชั้นน้ำ (Aquifer)	พื้นที่ศึกษา	
	ช่วงความลึก (ม.รทก.)	ความหนาเฉลี่ย(ม.)
ชั้นน้ำสมิหลา	+5 ถึง -5	5
ชั้นดินเหนียว (Aquitard)	-5 ถึง -15	5
ชั้นน้ำบ่อยาง	-5 ถึง -30	20
ชั้นดินเหนียว (Aquitard)	-20 ถึง -40	10
ชั้นน้ำสงขลา	-30 ถึง -70	30

3.2 การประเมินอัตราเพิ่มเติมน้ำ (Recharge)

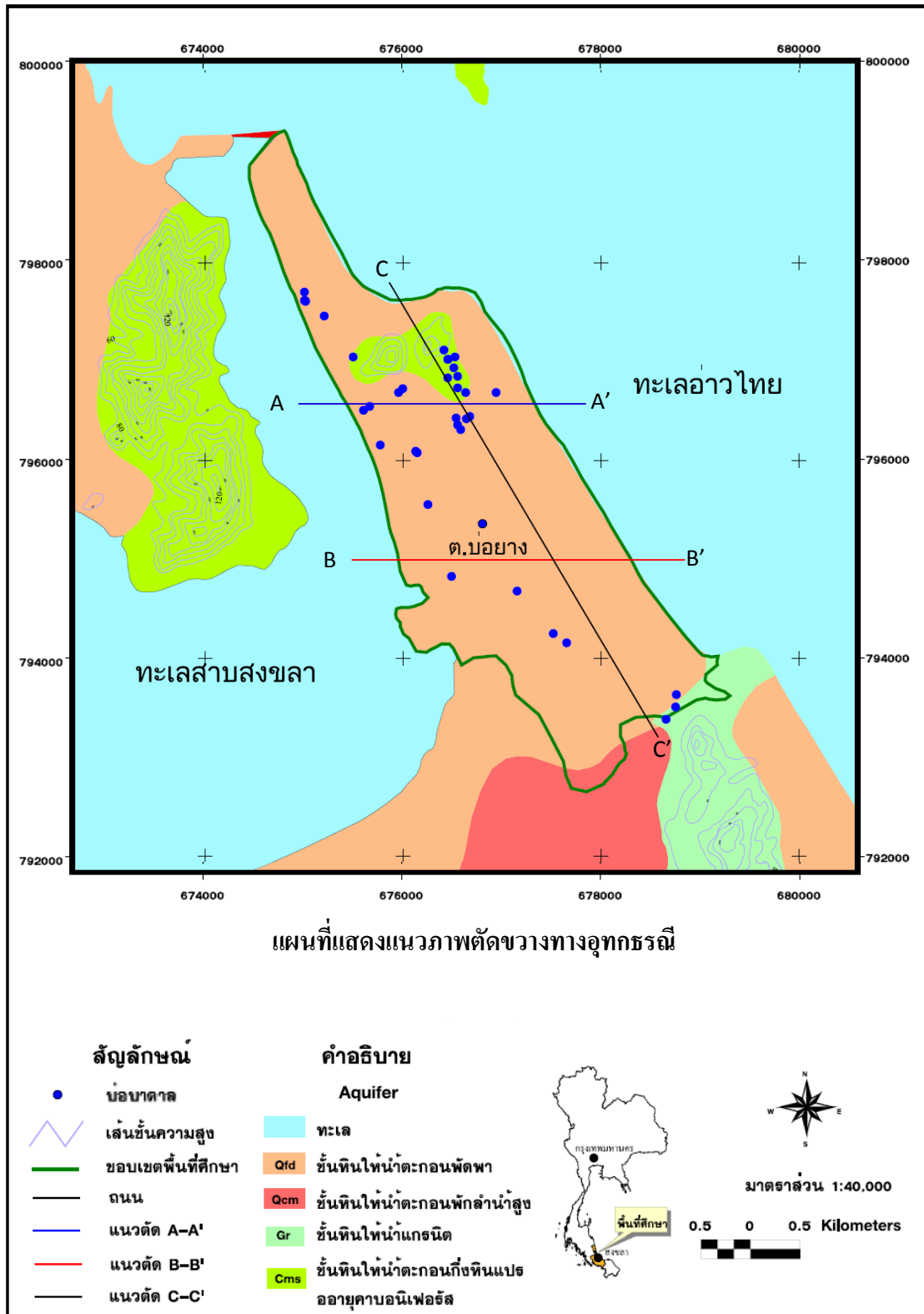
การประเมินอัตราการเพิ่มเติมน้ำ พิจารณาจากข้อมูลปริมาณน้ำฝน การคายระเหย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การเตรียมข้อมูลน้ำฝน

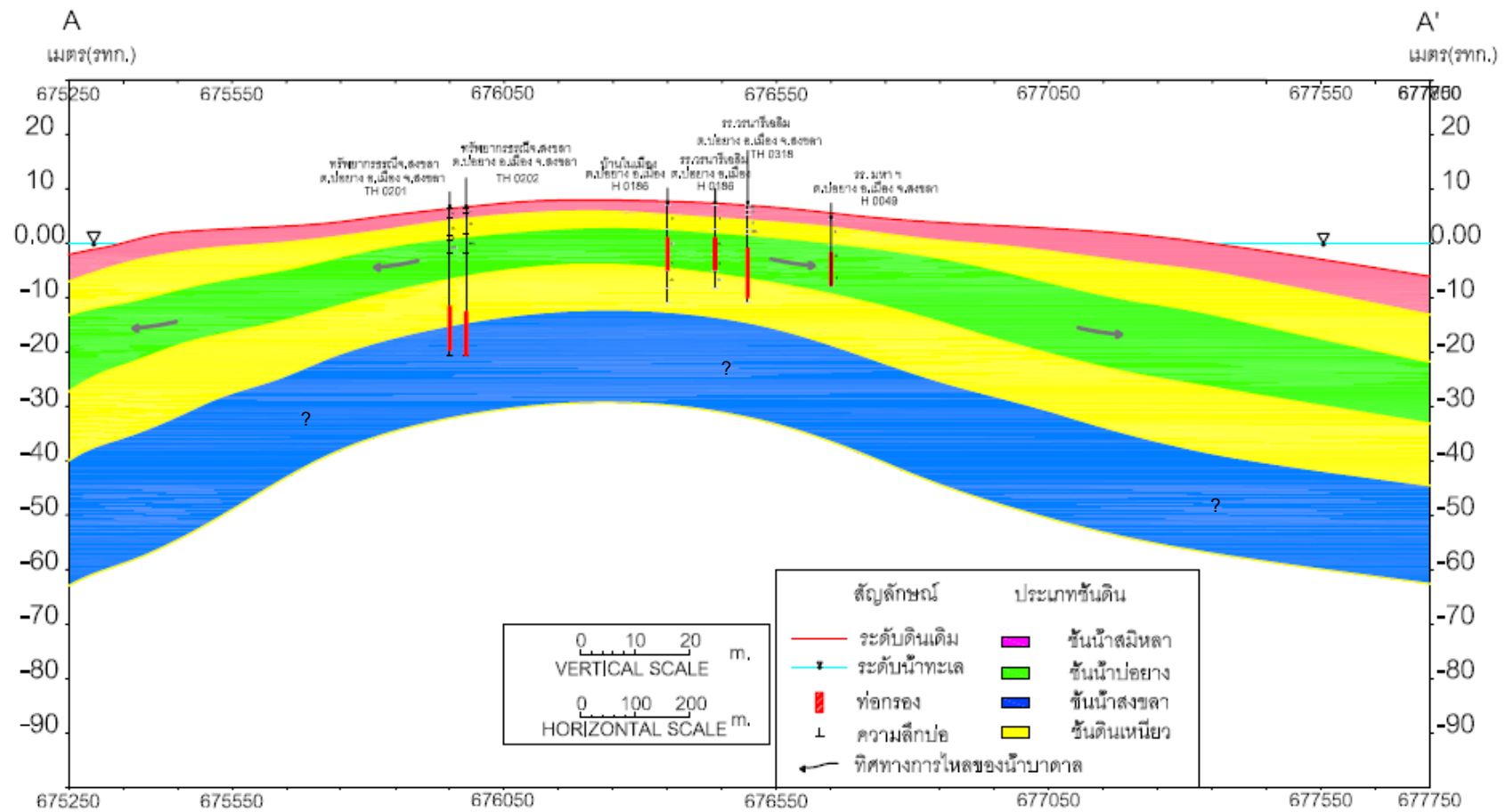
ข้อมูลปริมาณฝน ได้จากสถานีตรวจอากาศเมืองสงขลา โดยทำการเฉลี่ยปริมาณฝนที่ตกรายเดือนย้อนหลัง 20 ปี คือ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 ถึง พ.ศ. 2550 ดังแสดงในตารางที่ 3.5

2) การเตรียมข้อมูลการคายระเหย

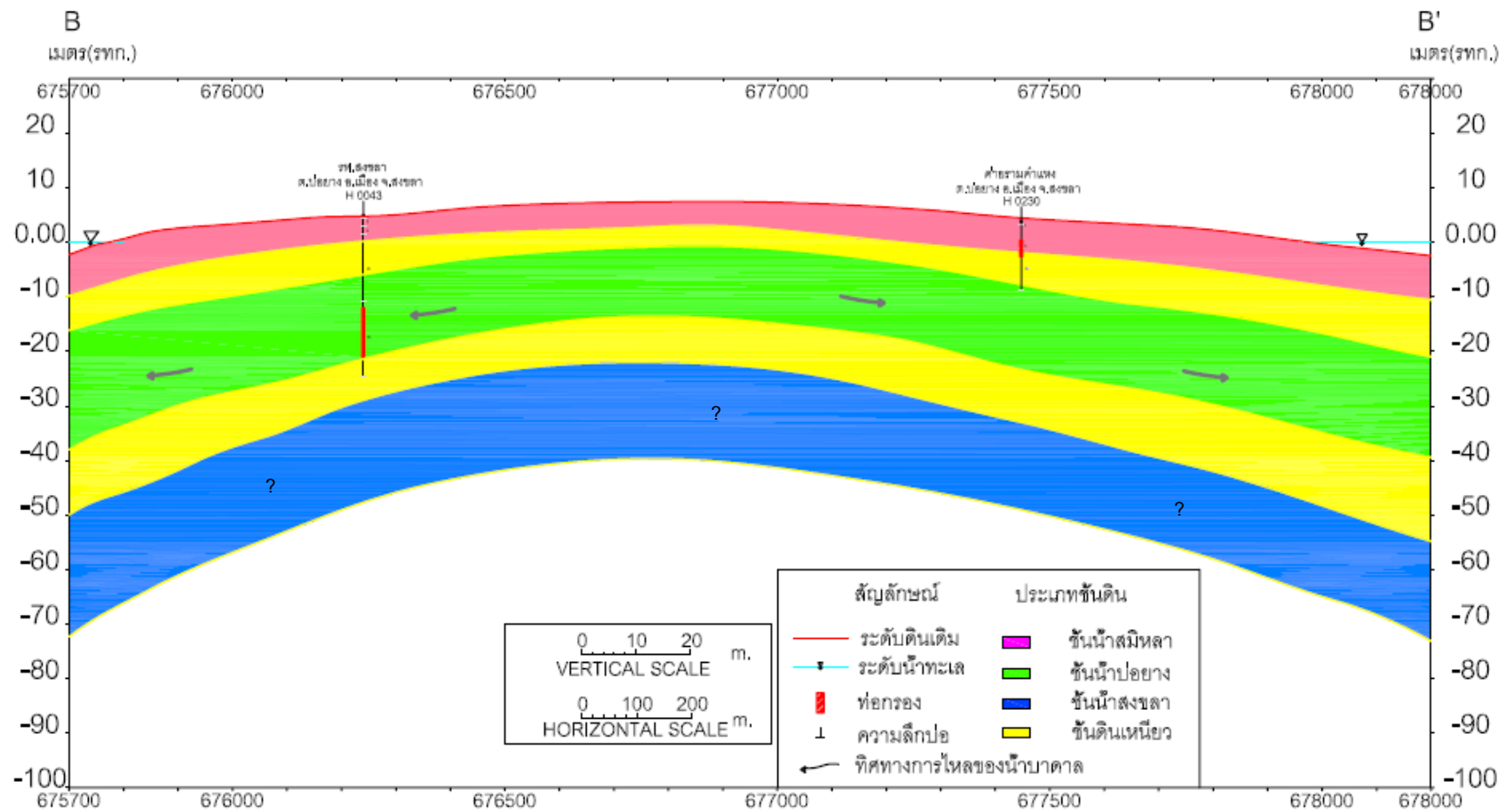
ข้อมูลการคายระเหยได้จาก สถานีตรวจอากาศเมืองสงขลา โดยทำการเฉลี่ยข้อมูลการคายระเหยรายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 ถึง พ.ศ. 2544 แต่เนื่องจากข้อมูลการคายระเหยที่ได้เป็นค่าการคายระเหยจากถาด จึงทำการคำนวณค่าการคายระเหยจริงโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การคายระเหย จากสมการของ FAO56 (Allen et al., 1998) โดยคำนึงถึงค่าความชื้นสัมพัทธ์ และ ความเร็วลม โดยค่าสัมประสิทธิ์การคายระเหยที่ใช้เท่ากับ 0.75 ปริมาณการคายระเหยเฉลี่ยที่คำนวณได้ แสดงไว้ในตารางที่ 3.6



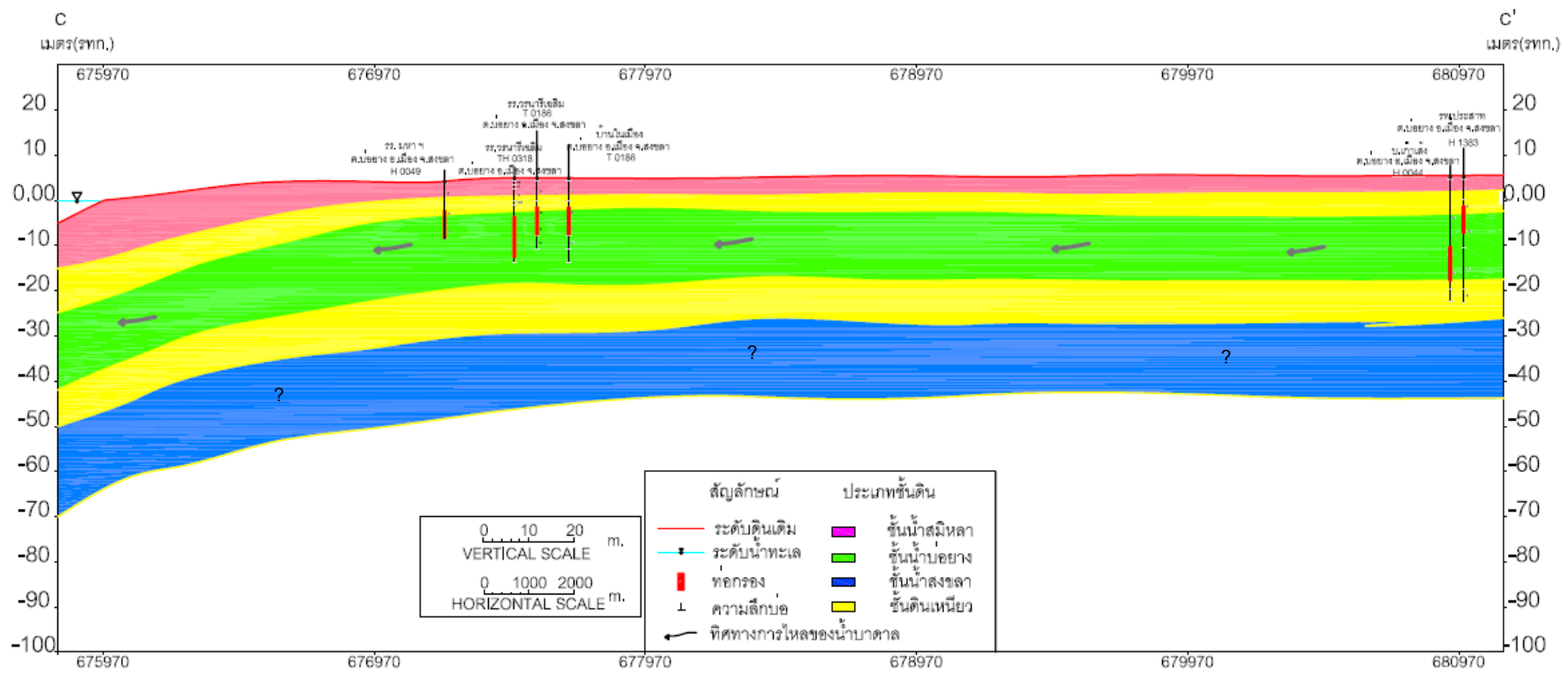
รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงแนวของภาพตัดขวางทางอุทกธรณีและบ่อน้ำบาดาล



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนวตะวันออก-ตะวันตก A-A'



รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนวตะวันออก-ตะวันตก B-B'



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนวเหนือ-ใต้ C-C'

ตารางที่ 3.5 ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 ถึง พ.ศ. 2550

เดือน	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี
ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย (มม.)	70	53	61	70	125	91	84	116	129	257	510	430	1994

ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา

ตารางที่ 3.6 ปริมาณการคายระเหยเฉลี่ย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 ถึง พ.ศ. 2544

เดือน	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี
การคายระเหย (มม.)	150	157	182	172	156	142	144	149	136	125	102	119	1738
factor	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
ค่าการคายระเหยจริง (มม.)	113	118	137	129	118	107	108	112	103	94	77	90	1304

ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา

3) ปริมาณการเติมน้ำสู่พื้นที่ศึกษา

การคำนวณปริมาณการเติมน้ำ (Recharge) ที่ลงสู่พื้นที่ศึกษา คำนวณได้จาก ปริมาณน้ำฝน (R), ค่าการคายระเหย (ETp), ปริมาณการกักเก็บ (S) โดยทั้งหมดมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (ขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณการเติมน้ำได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ) โดยผลการคำนวณปริมาณการเติมน้ำได้แสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งได้ใช้ค่าปริมาณน้ำฝนที่ได้จากตารางที่ 3.5 และค่าการคายระเหยได้จากตารางที่ 3.6

ผลการคำนวณการเติมน้ำ พบว่าค่าปริมาณการไหลออกรายเดือนในช่วงเดือน ตุลาคมถึงธันวาคม น้ำจะเคลื่อนที่ออกจากชั้นดินลงสู่ทะเล และบางส่วนไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Groundwater flow, GW)

จากตารางที่ 3.7 ได้ค่าปริมาณการไหลออกตลอดทั้งปี (OUTy) เท่ากับ 902 มิลลิเมตร เนื่องจากในพื้นที่ศึกษาไม่มีการเติมน้ำหรือรับน้ำจากแม่น้ำลำคลองจึงทำให้พจน์ของ stream ในตารางการคำนวณเป็นศูนย์ ดังนั้นปริมาณการการเติมน้ำสุทธิรายปี (GWnet) เท่ากับ 902 มิลลิเมตร นั่นคือในแต่ละปีจะมีน้ำไหลลงสู่ระบบน้ำบาดาลประมาณ 902 มิลลิเมตร หรือคิดเป็น 45% ของปริมาณฝนทั้งปี ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Misut et al.(2005) in Western long island, New York, USA.

ตารางที่ 3.7 ผลการคำนวณการเติมน้ำ ในพื้นที่ศึกษา

เดือน	R	ETp	R-ETp	S	ΔS	ETa	Out	Stream	Recharge
ม.ค.	70	113	-43	90	0	70	0	0	0
ก.พ.	53	118	-65	44	-46	99	0	0	0
มี.ค.	61	137	-76	25	-19	79	0	0	0
เม.ย.	70	129	-59	25	0	70	0	0	0
พ.ค.	125	118	7	32	7	118	0	0	0
มิ.ย.	91	107	-16	27	-5	96	0	0	0
ก.ค.	84	108	-25	25	-2	85	0	0	0
ส.ค.	116	112	4	29	4	112	0	0	0
ก.ย.	129	103	26	55	26	103	0	0	0
ต.ค.	257	94	163	90	35	94	129	0	129
พ.ย.	510	77	433	90	0	77	433	0	433
ธ.ค.	430	90	340	90	0	90	340	0	340
รายปี	1994	1304	690			1092	902	0	902

เมื่อ	R	=	ปริมาณน้ำฝน
	ETp	=	ศักย์ของการระเหย
	S	=	ปริมาณการกักเก็บ
	ΔS	=	ปริมาณการกักเก็บที่เปลี่ยนแปลง
	ETa	=	ปริมาณการระเหยจริง
	Out	=	ปริมาณการไหลออก

Stream = ปริมาณน้ำท่า

Recharge = ปริมาณการซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดิน

3.3 การประเมินอัตราการใช้น้ำบาดาล

การประเมินการใช้น้ำบาดาลได้ประเมินจากปริมาณความต้องการใช้น้ำของประชากรคือ 73 ลูกบาศก์เมตรต่อคนต่อปี (200 ลิตรต่อคนต่อวัน) คูณด้วยจำนวนประชากรเฉลี่ยในพื้นที่ศึกษาจากปี พ.ศ.2548 จนถึงปี พ.ศ.2550 คือ 74,906 คน (แสดงไว้ในภาคผนวก ง) แล้วหักออกด้วยปริมาณการใช้น้ำประปาเฉลี่ยในพื้นที่ ศึกษาจากปี พ.ศ.2548 ถึงปี พ.ศ.2550 คือ 5,007,113 ลูกบาศก์เมตรต่อปี (แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ) เช่นกัน จะเหลือเป็นปริมาณการใช้น้ำบาดาลของประชากรในพื้นที่ศึกษาเท่ากับ 461,025 ลูกบาศก์เมตรต่อปี (ประมาณ 0.01 ลิตรต่อคนต่อวัน) ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 การใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา

จำนวนประชากรเฉลี่ย (คน)	ความต้องการการใช้น้ำ (ลบ.ม./คน/ปี)	ปริมาณการใช้น้ำประปาเฉลี่ย (ลบ.ม./ปี)	การใช้น้ำในพื้นที่ศึกษา (ลบ.ม./ปี)
74,906	73	5,007,113	461,025

บทที่ 4

งานทดสอบและเก็บข้อมูลภาคสนาม

งานทดสอบและการเก็บตัวอย่างภาคสนามประกอบด้วย 1) การสำรวจพิกัดและค่าระดับบ่อน้ำบาดาล และ 2) การติดตามวัดระดับน้ำและตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาล ซึ่งมีรายละเอียดและวิธีการดังต่อไปนี้

4.1 การสำรวจพิกัดและค่าระดับบ่อน้ำบาดาล

การดำเนินการสำรวจโดยการคัดเลือกบ่อสังเกตการณ์ที่เจาะโดยหน่วยงานของรัฐ ซึ่งกระจายตัวครอบคลุมในพื้นที่ศึกษา จากนั้นเลือกบ่อน้ำบาดาลที่ใช้เป็นบ่อสังเกตการณ์จำนวน 8 บ่อ ดำเนินการรังวัดระดับและพิกัดบ่อน้ำบาดาล โดยใช้การสำรวจด้วยกล้อง GPS system 500 ซึ่งสามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำด้วยการตรวจวัดแบบ Static observation และระบุค่าพิกัดในระบบ UTM (WGS 84) ซึ่งในการรังวัดจะต้องใช้กล้อง GPS system 500 อย่างน้อย 2 ชุด โดยชุดแรกจะกำหนดให้เป็นชุดอ้างอิง (Reference) ส่วนชุดที่ 2 จะใช้เพื่อตรวจวัดค่าพิกัด (Rover) ในตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัด เมื่ออุปกรณ์บันทึกค่าจนถึงระดับความแม่นยำที่ต้องการแล้ว นำข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดมาประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม SKI-Pro โดยทำการสอบเทียบและอ้างอิงค่ากับหมุดควบคุมหลักที่มีค่าพิกัดแล้ว สำหรับการสำรวจในครั้งนี้ กำหนดให้มีระดับความผิดพลาดได้สูงสุดไม่เกิน ± 20 ซม. ซึ่งบ่อสังเกตการณ์ที่คัดเลือกไว้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และระดับของบ่อสังเกตการณ์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนที่แสดงตำแหน่งบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดค่าพิกัดและระดับบ่อน้ำบาดาลด้วยกล้อง GPS System 500 (15 กันยายน 2550)

หมายเลขบ่อ	สถานี	พิกัดบ่อ		ค่าระดับ ม. (รทก.)	ชั้นน้ำ
		ออก-ตก	เหนือ-ใต้		
OW1	เทคโนโลยี สงขลา	677339	795715	+4.157	บ่อข้าง
OW2	ศาลากลาง	676636	796430	+4.316	บ่อข้าง
OW3	เทศบาล	676620	796688	+4.348	สมิหลา
OW4a	สนามกอล์ฟทองใหญ่	676575	797329	+2.122	บ่อข้าง
OW4b					
OW4c					
OW5	แหลมสนอ่อน	674731	798219	+0.556	บ่อข้าง
OW6	รร.วิเชียรชม	675619	796535	+1.141	บ่อข้าง
OW7a	พิพิธภัณฑน์รามาธิบดี	675884	796160	+2.427	สมิหลา
OW7b		Na.	Na.	Na.	บ่อข้าง
OW8	รร.เทศบาล 1	676238	794759	+2.528	สมิหลา

หมายเหตุ

Na. = วัดค่าไม่ได้

4.2 การติดตามวัดระดับน้ำและตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาล

การติดตามวัดระดับน้ำและตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ
 1) งานติดตามระดับน้ำ และ 2) เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลมาตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาลในห้องปฏิบัติการ การติดตามข้อมูลดังกล่าวได้ดำเนินการทุกๆ 3 เดือน จำนวน 4 ครั้ง ได้แก่

ครั้งที่	1	เดือนกันยายน	พ.ศ. 2551
ครั้งที่	2	เดือนธันวาคม	พ.ศ. 2551
ครั้งที่	3	เดือนมีนาคม	พ.ศ. 2552
ครั้งที่	4	เดือนมิถุนายน	พ.ศ. 2552

1) การตรวจวัดระดับน้ำ

การตรวจวัดระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์ที่คัดเลือกไว้ เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในรอบปีเพื่อใช้เปรียบเทียบแบบจำลอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดระดับน้ำประกอบด้วย

1) ชุดวัดระดับน้ำ

2) ตลับเมตร

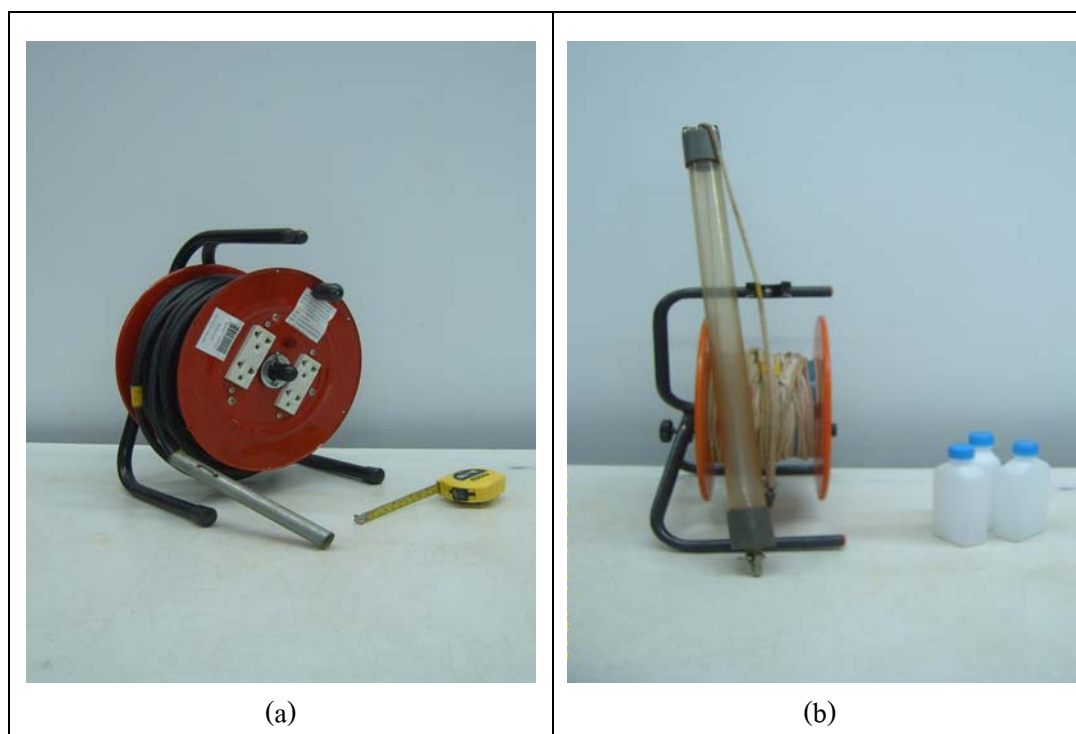
ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 (a) ส่วนภาพการวัดระดับน้ำในสนามได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 (a)

ระดับน้ำที่วัดได้สามารถนำมาเขียนแผนที่แสดง Contour ของระดับน้ำบาดาล (เดือนธันวาคม 2551) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 สำหรับชั้นน้ำสมิหลาและชั้นน้ำบ่ออย่างตามลำดับ แต่ในส่วนของชั้นน้ำสงขลา ซึ่งเป็นชั้นน้ำชั้นที่ลึกที่สุดนั้นไม่สามารถที่จะแสดงระดับแรงดันน้ำได้เนื่องจากบ่อในพื้นที่ศึกษาที่เจาะลึกลงไปในระดับนั้นมีน้อยมากและไม่สามารถวัดระดับน้ำได้ (ผลการตรวจวัดระดับน้ำทั้ง 4 ครั้งแสดงไว้ใน ภาคผนวก ค)

ผลการตรวจวัดระดับน้ำทั้ง 3 ชั้น จำนวน 4 ครั้ง พบว่า ระดับแรงดันน้ำจะสูงบริเวณทิศใต้และบริเวณกึ่งกลางของพื้นที่ศึกษา แล้วค่อยๆ ลดระดับต่ำลงไปทางบริเวณขอบทางด้านทิศเหนือ ทิศตะวันออก และ ทิศตะวันตก ซึ่งจะไหลลงไปทางทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย นอกจากนี้ยังพบว่าระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล นั่นคือมีระดับสูงในช่วงฤดูฝนและลดลงในช่วงฤดูแล้ง โดยพบว่าระดับน้ำสูงสุดอยู่ที่ +3.5 ม. รทก. บริเวณท่าอากาศยานสงขลา

2) การตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาล

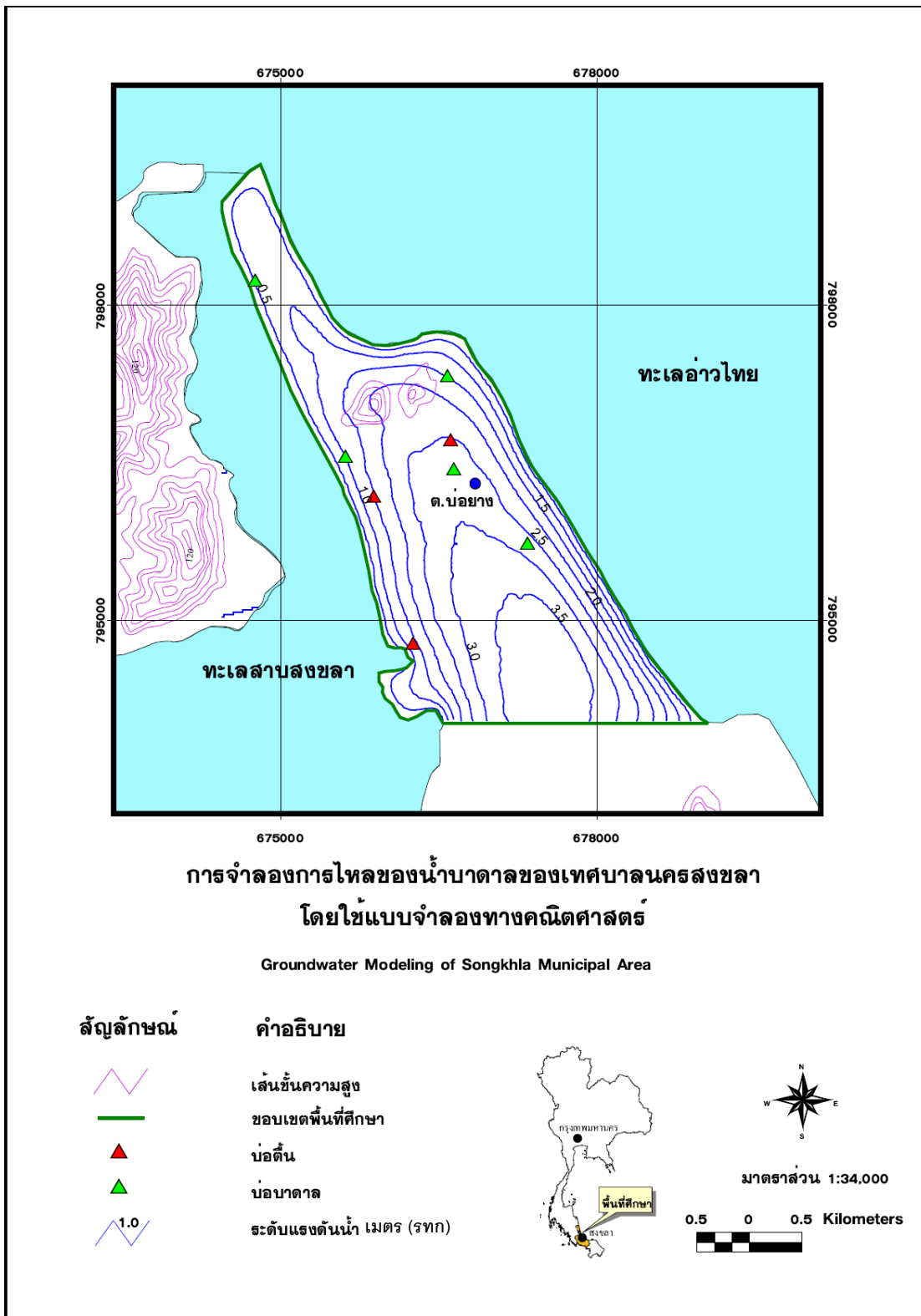
ตัวอย่างน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ที่คัดเลือกไว้ ถูกนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่าความเป็นกรดเบส (pH), ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS), ค่าความเค็ม (Salinity), ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) และ คลอไรด์ (Chloride) โดยพารามิเตอร์สำคัญที่แสดงการรุกรานของน้ำเค็มและใช้เปรียบเทียบแบบจำลองด้วย คือ ปริมาณคลอไรด์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลประกอบด้วย กระบอกเก็บน้ำและขวดเก็บตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.2 (b) ภาพการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในสนามดังแสดงในรูปที่ 4.3 (b) (ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาลทั้ง 4 ครั้งแสดงไว้ใน ภาคผนวก ค)



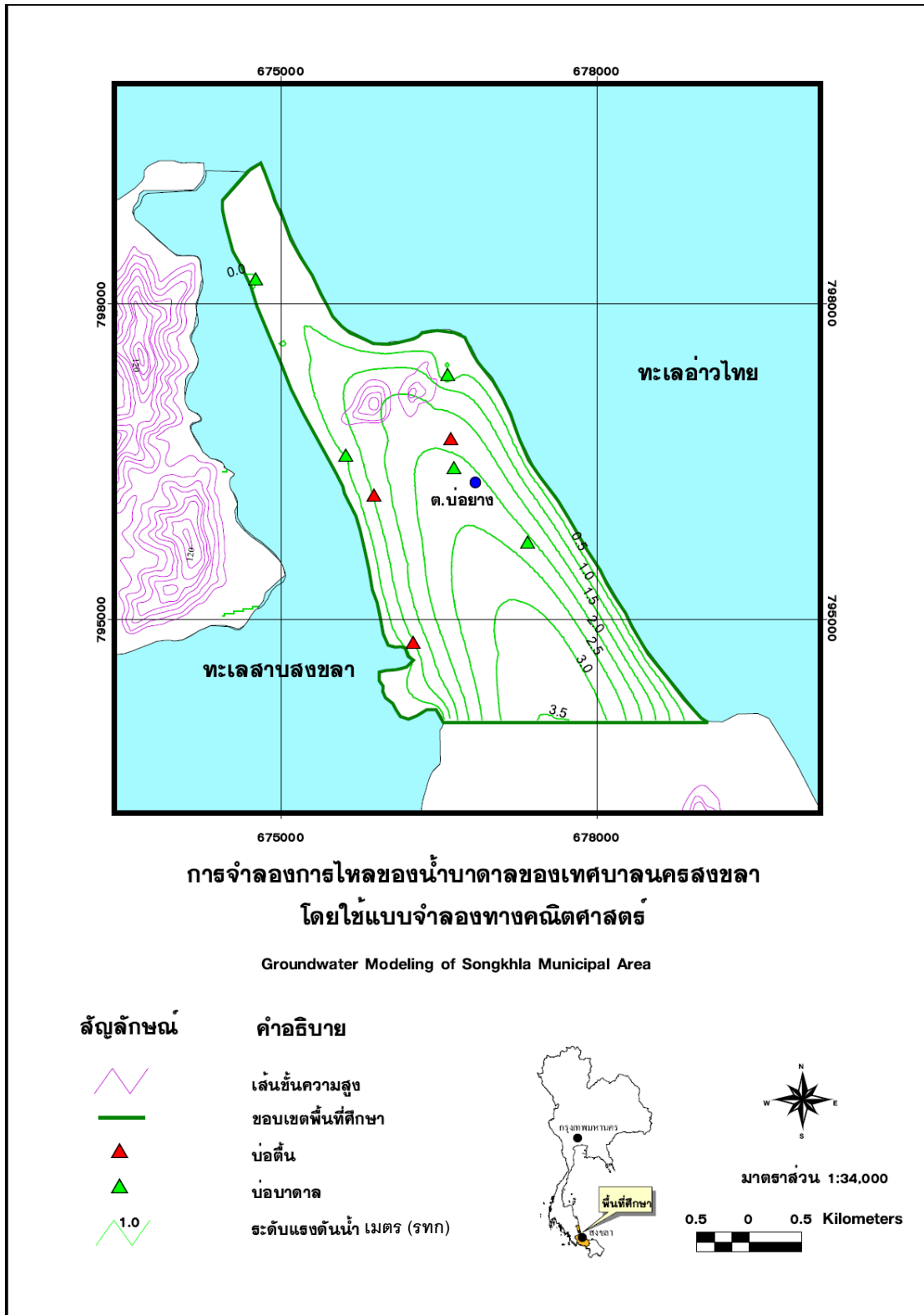
รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ (a) อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำบาดาล (b)



รูปที่ 4.3 การตรวจวัดระดับน้ำในสนาม (a) การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในสนาม (b)



รูปที่ 4.4 แผนที่แสดงระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำสมิหลา (ธันวาคม 2551)



รูปที่ 4.5 แผนที่แสดงระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำบ่อทราย (ธันวาคม 2551)

2.1 คุณภาพน้ำบาดาลชั้นน้ำสมิหลา

ค่าเฉลี่ยผลการตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างน้ำบาดาลในชั้นน้ำสมิหลาทั้ง 4 ครั้ง จำนวน 3 บ่อ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 4.2 โดยรายละเอียดคุณภาพน้ำบาดาลได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำสมิหลา (กันยายน 2551 ถึง มิถุนายน 2552)

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย (Avg.)			ค่ามาตรฐาน
		Ow3	Ow7	Ow8	
กรด-ด่าง (pH)	-	6.5	7.0	7.0	7-8.5
ความเค็ม (Salinity)	ppt.	0.2	0.1	0.2	<0.5
ความนำไฟฟ้า (Conductivity)	$\mu\text{S}/\text{cm}$	393.9	257.6	536.4	-
ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ (TDS)	mg/l	269.5	179.4	366.5	<600
คลอไรด์ (Chloride)	mg/l	26.7	15.5	43.1	<250

มาตรฐาน: กระทรวงอุตสาหกรรม 2550

1) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของพื้นที่ศึกษามีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.4 ถึง 7.5 และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6.8 ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำดื่มเล็กน้อย

2) ความเค็ม (Salinity) ในพื้นที่ศึกษามีค่าความเค็ม อยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 0.3 ppt. โดยทั่วไปน้ำจะเริ่มมีรสเค็มเมื่อมีค่ามากกว่า 0.5 ppt. ซึ่งค่าเฉลี่ยของน้ำบาดาลมีค่าความเค็มประมาณ 0.2 หมายความว่าโดยทั่วไปน้ำในชั้นน้ำสมิหลานี้ยังเป็นน้ำจืดอยู่แต่บริเวณที่อาจจะมีน้ำเค็มจะอยู่ในบริเวณขอบของพื้นที่ที่ติดกับทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย

3) ความนำไฟฟ้า (Conductivity) ในพื้นที่ศึกษามีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 63.8 ถึง 668.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 396 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4) สารทั้งหมดที่ละลายได้ (TDS) พื้นที่ศึกษา น้ำบาดาลมีปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายน้ำได้อยู่ระหว่าง 43.4 ถึง 478.0 mg/l. ซึ่งยังต่ำกว่าค่ามาตรฐาน

5) คลอไรด์ (Cl) ในชั้นน้ำบ่อของพื้นที่ศึกษามีปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี คือมีค่าระหว่าง 10.8 ถึง 63.48 mg/l. ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานอยู่มาก แสดงให้เห็นว่าน้ำบาดาลในชั้นน้ำนี้ยังไม่มีการรุกคืบของน้ำเค็ม ส่วนภาพการกระจายตัวของคลอไรด์ในชั้นน้ำสมิหลา (เดือนมิถุนายน 2552) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6

2.2 คุณภาพน้ำบาดาลชั้นน้ำบ่อ

ค่าเฉลี่ยผลการตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างน้ำบาดาลในชั้นน้ำบ่ออย่างทั้ง 4 ครั้ง จำนวน 5 บ่อ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำบ่อ (กันยายน 2551 ถึง มิถุนายน 2552)

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย (Avg.)							ค่ามาตรฐาน
		Ow1	Ow2	Ow4a	Ow4b	Ow4c	Ow5	Ow6	
กรด-ด่าง (pH)	-	7.2	7.4	8.8	7.9	9.6	7.8	6.4	7-8.5
ความเค็ม (Salinity)	ppt.	0.1	0.2	3.6	0.2	0.8	0.7	1.1	<0.5
ความนำไฟฟ้า (Conductivity)	μS/cm	380.6	430.5	6,296	520.9	1,570	1,475	2,171	-
ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ (TDS)	mg/l	259.8	278.3	4,438	358.5	1,086	1,014	1,494	<600
คลอไรด์ (Chloride)	mg/l	22.7	22.4	1867	27.9	510	450.7	848	<250

มาตรฐาน: กระทรวงอุตสาหกรรม 2550

1) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) พื้นที่ศึกษามีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.4 ถึง 10.1 และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 7.8 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงของค่ามาตรฐานน้ำดื่ม

2) ความเค็ม (Salinity) พื้นที่ศึกษามีค่าความเค็ม อยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 5.4 ppt. โดยทั่วไป น้ำจะเริ่มมีรสเค็มเมื่อมีค่ามากกว่า 0.5 ppt. ซึ่งค่าเฉลี่ยของน้ำบาดาลมีค่าความเค็มประมาณ 0.8 หมายความว่าโดยทั่วไปน้ำในชั้นน้ำบ่อแบบนี้ส่วนใหญ่จะมีรสเค็มไปแล้วซึ่งจะอยู่ในบริเวณขอบทางทิศเหนือของพื้นที่ที่ติดกับทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย

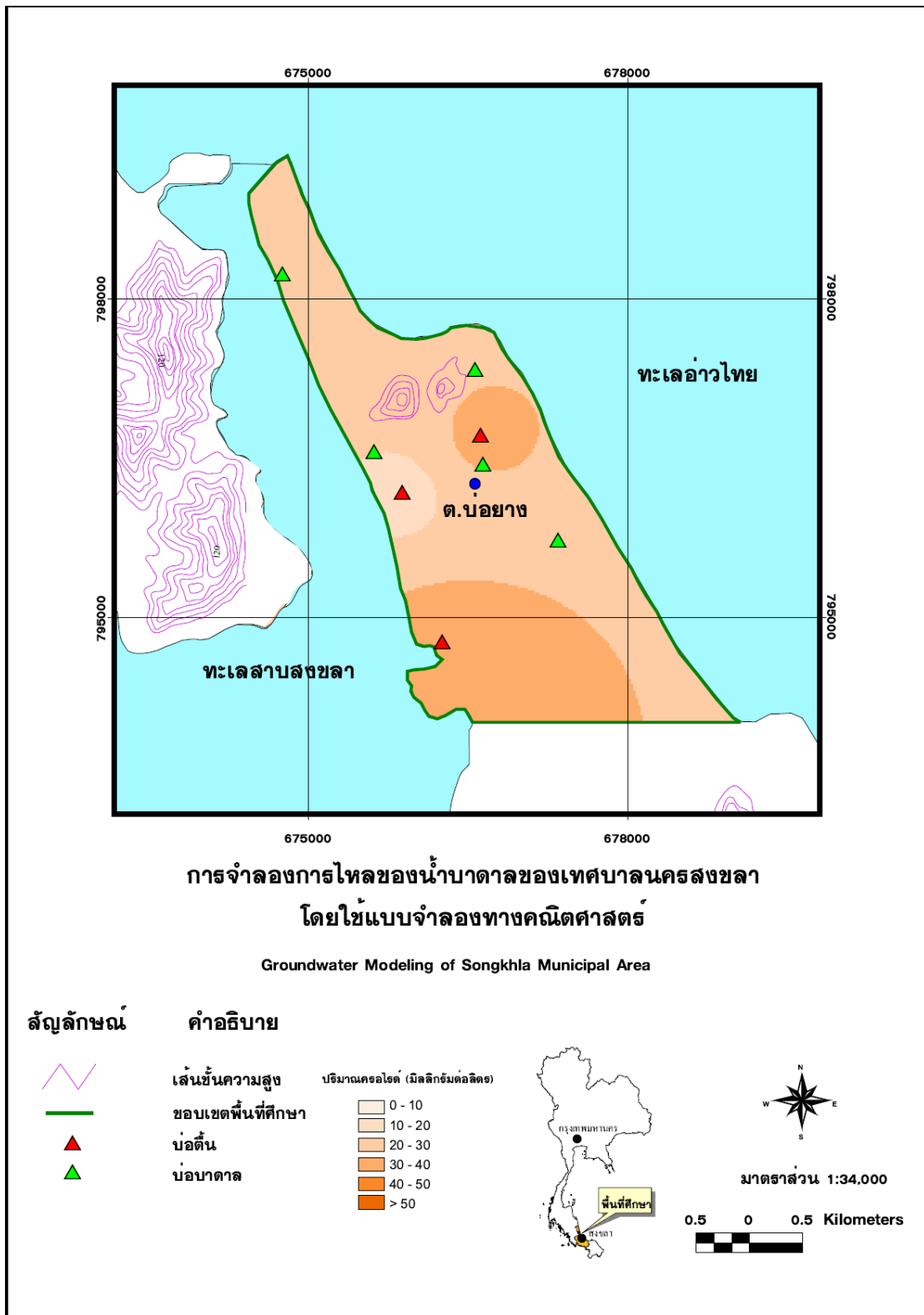
3) ความนำไฟฟ้า (Conductivity) พื้นที่ศึกษามีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 117.1 ถึง 8,680 $\mu\text{S}/\text{cm}$. และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1631.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$

4) สารทั้งหมดที่ละลายได้ (TDS) พื้นที่ศึกษา น้ำบาดาลมีปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายน้ำได้อยู่ระหว่าง 79.6 ถึง 6309 mg/l. และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1134.8 mg/l. ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐาน

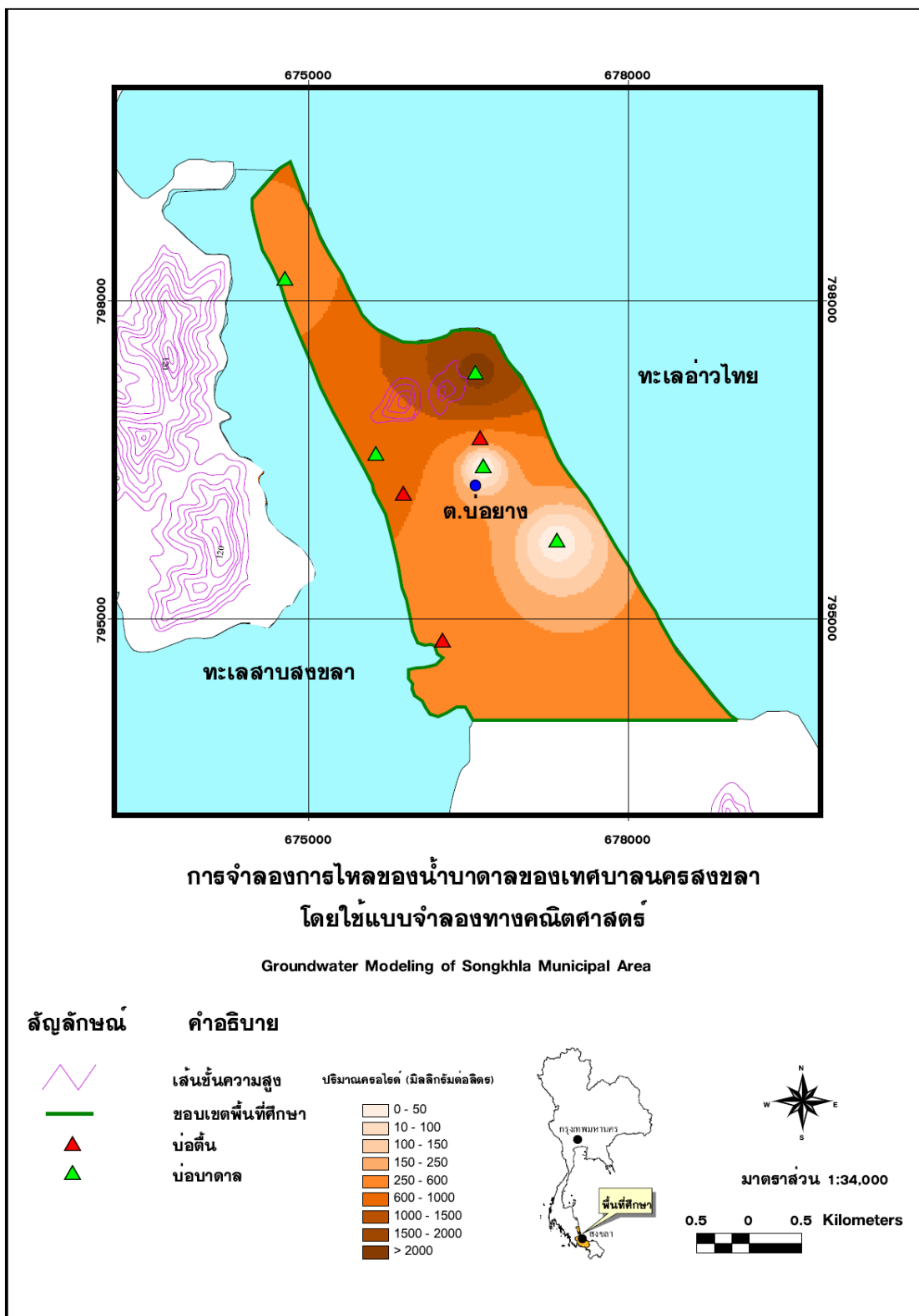
5) คลอไรด์ (Cl) ในชั้นน้ำบ่อของพื้นที่ศึกษามีปริมาณคลอไรด์อยู่ระหว่าง 9.8 ถึง 2,930.4 mg/l. และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 472.4 mg/l โดยบริเวณที่มีปริมาณคลอไรด์สูงแสดงให้เห็นว่าเป็นน้ำกร่อยหรือเค็ม ซึ่งอยู่จะทางทิศเหนือของพื้นที่ตั้งแต่แหลมสนอ่อนจรดมาจนถึงบริเวณเขาตังกวน ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานน้ำดื่มอยู่มาก ส่วนภาพการกระจายตัวของคลอไรด์ในชั้นน้ำบ่อของ (เดือนมิถุนายน 2552) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7

2.3 คุณภาพน้ำบาดาลชั้นน้ำสงขลา

จากการสำรวจในพื้นที่ศึกษาพบว่าการใช้น้ำบาดาลจากชั้นน้ำสงขลานั้นมีน้อยมาก ทำให้บ่อที่มีการเจาะไปจนถึงชั้นน้ำสงขลานั้นแทบไม่พบเลยนั่นอาจเป็นเพราะน้ำที่ได้จากชั้นน้ำสงขลาเป็นน้ำกร่อย ดังนั้น ในการตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างน้ำบาดาลในชั้นน้ำสงขลาจึงไม่สามารถที่จะนำตัวอย่างน้ำมาตรวจสอบวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีได้



รูปที่ 4.6 ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ (ชั้นน้ำสมิหลา, มิถุนายน 2552)

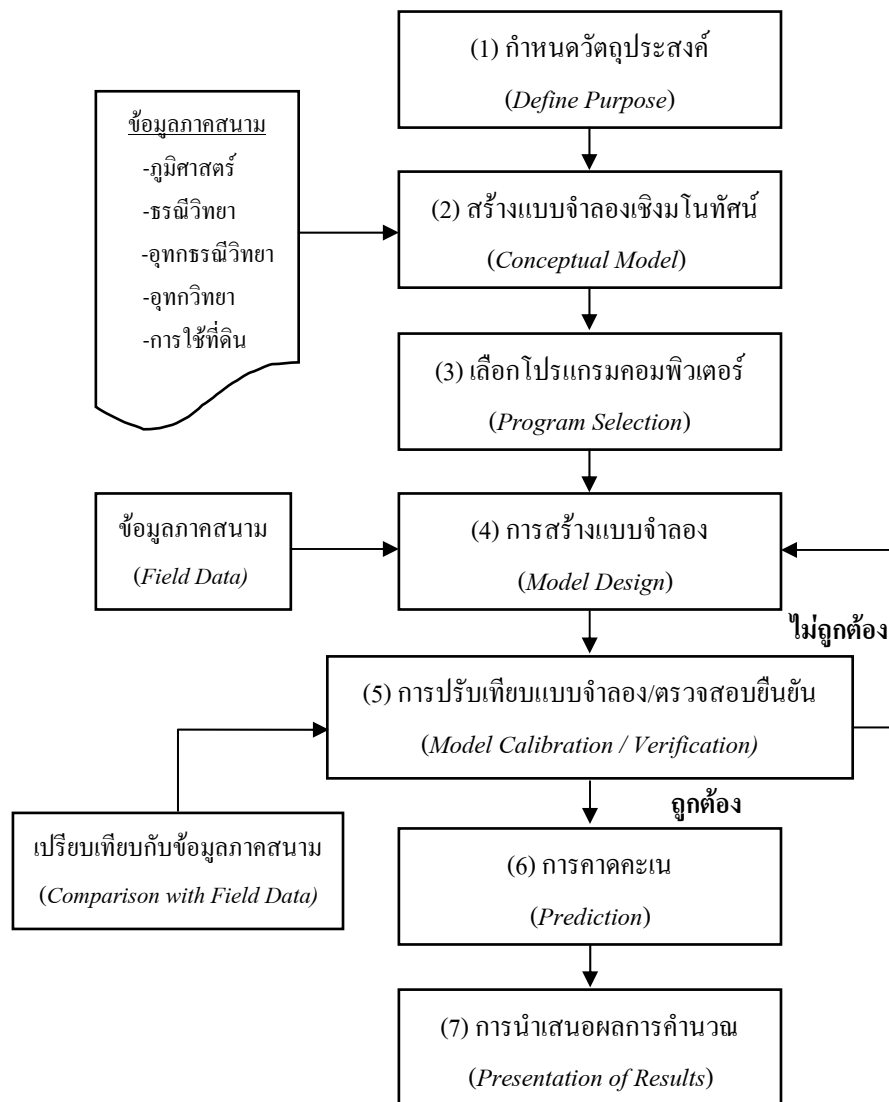


รูปที่ 4.7 ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ (ชั้นน้ำบ่อทราย, มิถุนายน 2552)

บทที่ 5

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การจัดทำแบบจำลองเพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ระบบสมมูลน้ำบาดาล การไหลของน้ำ และวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของความเค็มที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำบาดาลของเทศบาลนครสงขลา แบ่งขั้นตอนการจัดทำออกเป็น 7 ขั้นตอนดังรูปที่ 5.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ดัดแปลงจาก Anderson and Woessner, 1991)

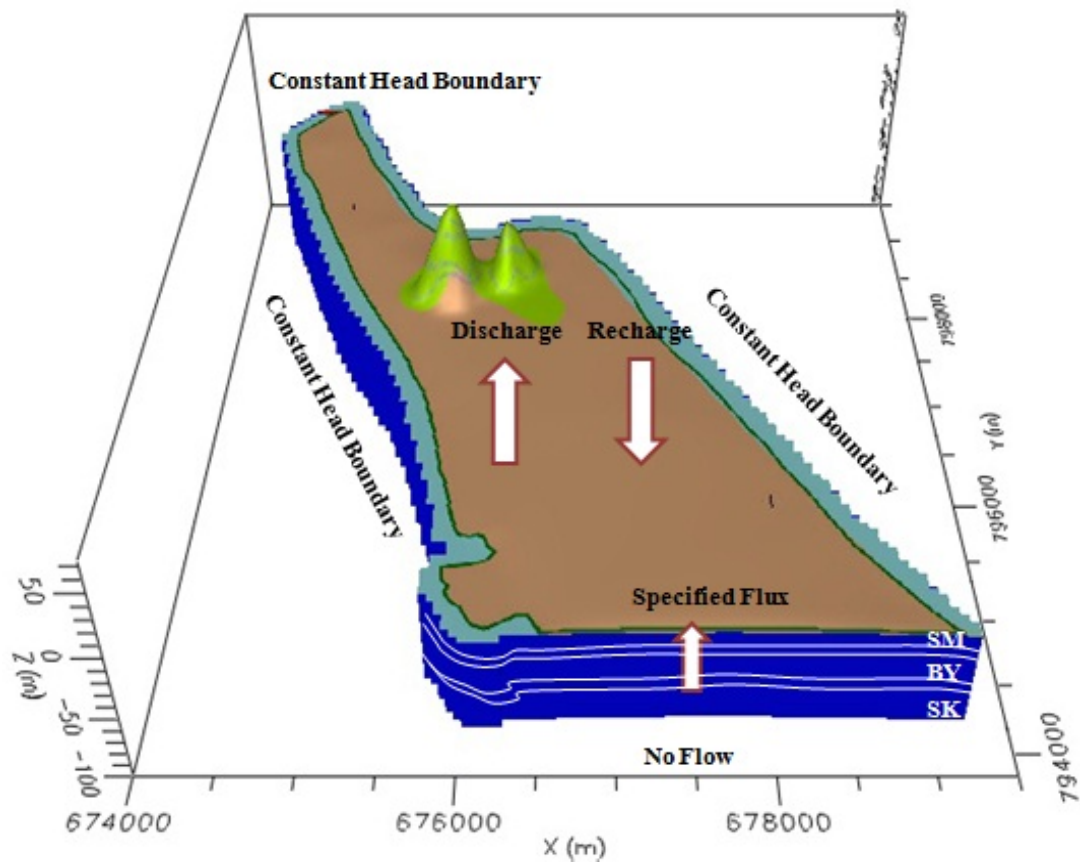
5.1 กำหนดวัตถุประสงค์ (Define Purpose)

- 1) ศึกษาการไหลความสมดุลของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ให้ทราบถึงปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบ และไหลออกจากระบบตามธรรมชาติในแต่ละปี
- 2) ศึกษาการแพร่กระจายของน้ำเค็ม เพื่อคาดการณ์การรุกคืบของน้ำเค็มในอนาคต
- 3) ประเมินศักยภาพน้ำบาดาล และเพื่อกำหนดปริมาณการสูบน้ำสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการรุกของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

5.2 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model)

แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ คือบทสรุปความเข้าใจของลักษณะทางกายภาพ และระบบการไหลของน้ำบาดาลของพื้นที่ศึกษา จากการวิเคราะห์ข้อมูลของพื้นที่ศึกษาซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลธรณีวิทยา ธรณีสัณฐานอุทกธรณีวิทยา อุทกวิทยา สภาพภูมิประเทศ การใช้น้ำบาดาล สภาพดินและการใช้ที่ดิน ผลที่ได้เป็นข้อมูลเชิงตัวเลข แผนที่ และภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา ซึ่งจะนำไปใช้ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและตรวจสอบผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ความซับซ้อนของลักษณะธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยาในเทศบาลนครสงขลาสามารถสรุปเป็นแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual model) ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.2

แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของเทศบาลนครสงขลาสามารถแบ่งออกเป็น 5 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นน้ำสมิหลา ชั้นน้ำบ่อยางและชั้นน้ำสงขลาตามลำดับและ ชั้นหินกั้นน้ำ (Aquitard) 2 ชั้น กั้นระหว่างชั้นหินอุ้มน้ำ ชั้นล่างสุดพิจารณาให้ไม่มีการซึมผ่านของน้ำในแนวตั้ง (No flow boundary) ส่วนทางทิศเหนือ ทิศตะวันออกและตะวันตกของพื้นที่ (ทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย) พิจารณาให้เป็นขอบเขตระดับน้ำใต้ดินคงที่ตลอดเวลา (Constant head boundary) ขอบของพื้นที่ด้านทิศใต้กำหนดให้เป็นขอบเขตที่มีน้ำไหลผ่าน (Specified Flux) ส่วนพื้นที่ผิวดินด้านบนพิจารณาให้น้ำสามารถซึมผ่านลงไปได้ โดยกำหนดให้เป็นพื้นที่รับน้ำ (Recharge boundary)



รูปที่ 5.2 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของเทศบาลนครสงขลา

ทั้งนี้ในการจำลองระบบอุทกธรณีวิทยาได้ตั้งสมมติฐานในการจำลองเชิงตัวเลข ดังนี้

- 1) ชั้นหินอุ้มน้ำแต่ละชั้นมีคุณสมบัติเป็น Homogeneous และ Anisotropic
- 2) ชั้นหินอุ้มน้ำในเทศบาลนครสงขลาเป็นชั้นหินร่วน (Unconsolidated aquifer)
- 3) กรณีจำลองการไหล กำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำคงที่ (Constant density)
- 4) กรณีจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม กำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Variable density) นั่นคือความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของน้ำจืดและน้ำเค็มมีผลต่อแบบจำลอง

5.3 เลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Program Selection)

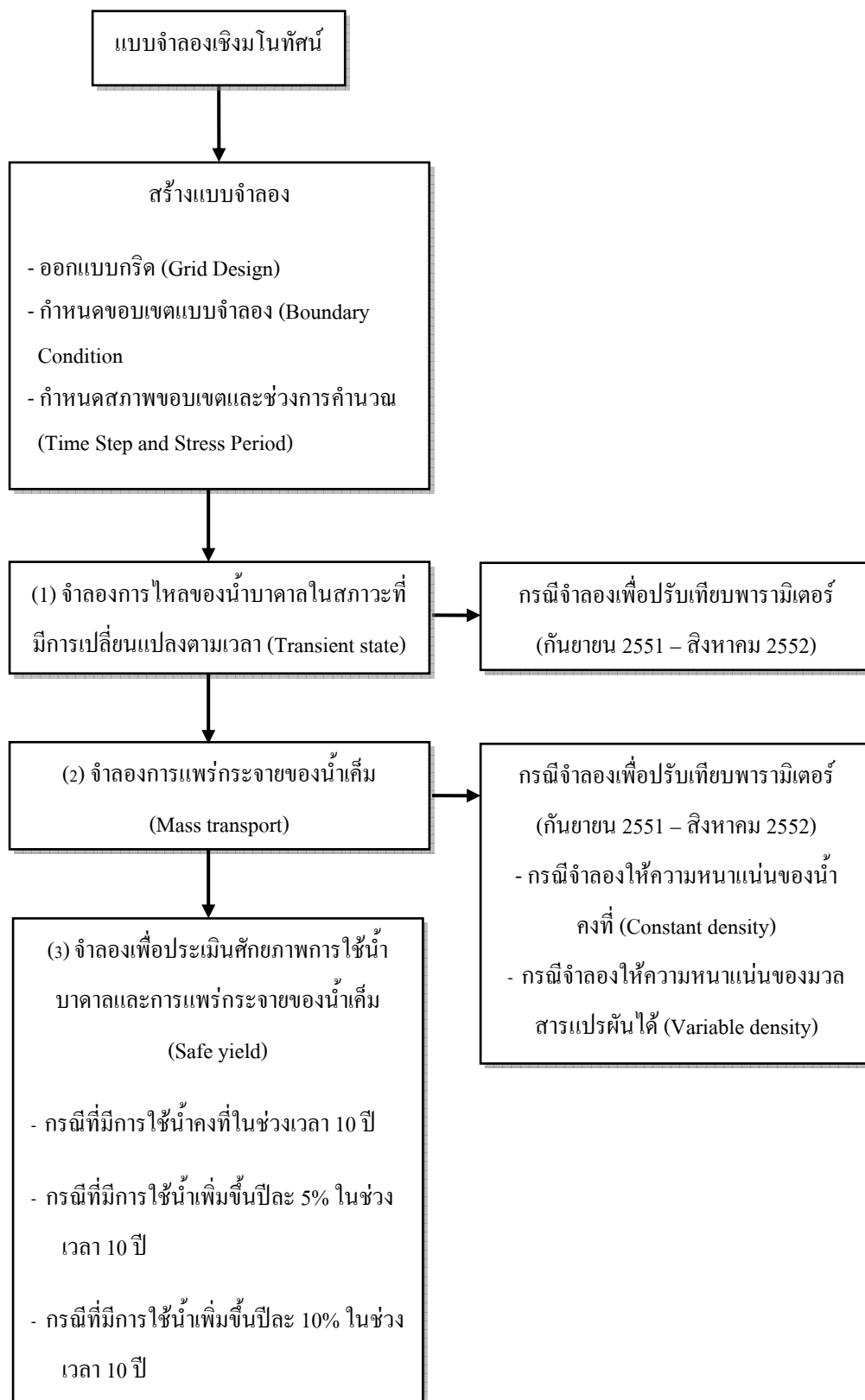
โปรแกรมที่จะนำมาสร้างแบบจำลองน้ำบาดาลในการศึกษานี้จะใช้โปรแกรม Visual MODFLOW Version 4.1 Pro พัฒนาโดยบริษัท Waterloo Hydrogeologic, Inc. จากประเทศแคนาดา โปรแกรมนี้ประกอบด้วยโปรแกรม MODFLOW-2000, MODPATH, MT3DMS, RT3D, Zone Budget, Stream Routing Package, WinPEST, และ VMOD 3D-Explorer ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการศึกษาศักยภาพและสมดุลของน้ำบาดาลในโครงการ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในการศึกษานี้คือ MODFLOW (MODular finite-difference ground-water FLOW model) เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการคำนวณการไหลของน้ำบาดาลในระบบ 3 มิติ เนื่องจากประยุกต์เข้ากับปัญหาได้ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน เป็นการคำนวณแบบ Finite Difference ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณค่าการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำบาดาลในการศึกษานี้คือ MT3DMS (A Modular 3-Dimensional Multi-Species Transport Model) เป็นแบบจำลองที่นำมาใช้ประยุกต์ร่วมกับ MODFLOW ใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาล

นอกจากนี้ยังใช้โปรแกรม SEAWAT เป็นโปรแกรมหนึ่งซึ่งรวมอยู่ใน Visual MODFLOW เหมาะสำหรับคำนวณการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของมวลสารแบบ 3 มิติ โดยใช้ความหนาแน่นของมวลสาร (Variable Density) ในการวิเคราะห์ รวมถึงใช้วิเคราะห์การไหลของน้ำใต้ดินกรณีเปลี่ยนแปลงตามด้วย

5.4 การสร้างแบบจำลอง (Model Design)

ในการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา ได้แบ่งการจำลองออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ การจำลองการไหลสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient state flow) การจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม (Mass transport) และการจำลองเพื่อประเมินศักยภาพการใช้น้ำบาดาล (Groundwater potential assessment) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ส่วนในการสร้างแบบจำลองมี 3 ขั้นตอนเช่นกันซึ่งมีเียบคดังต่อไปนี้

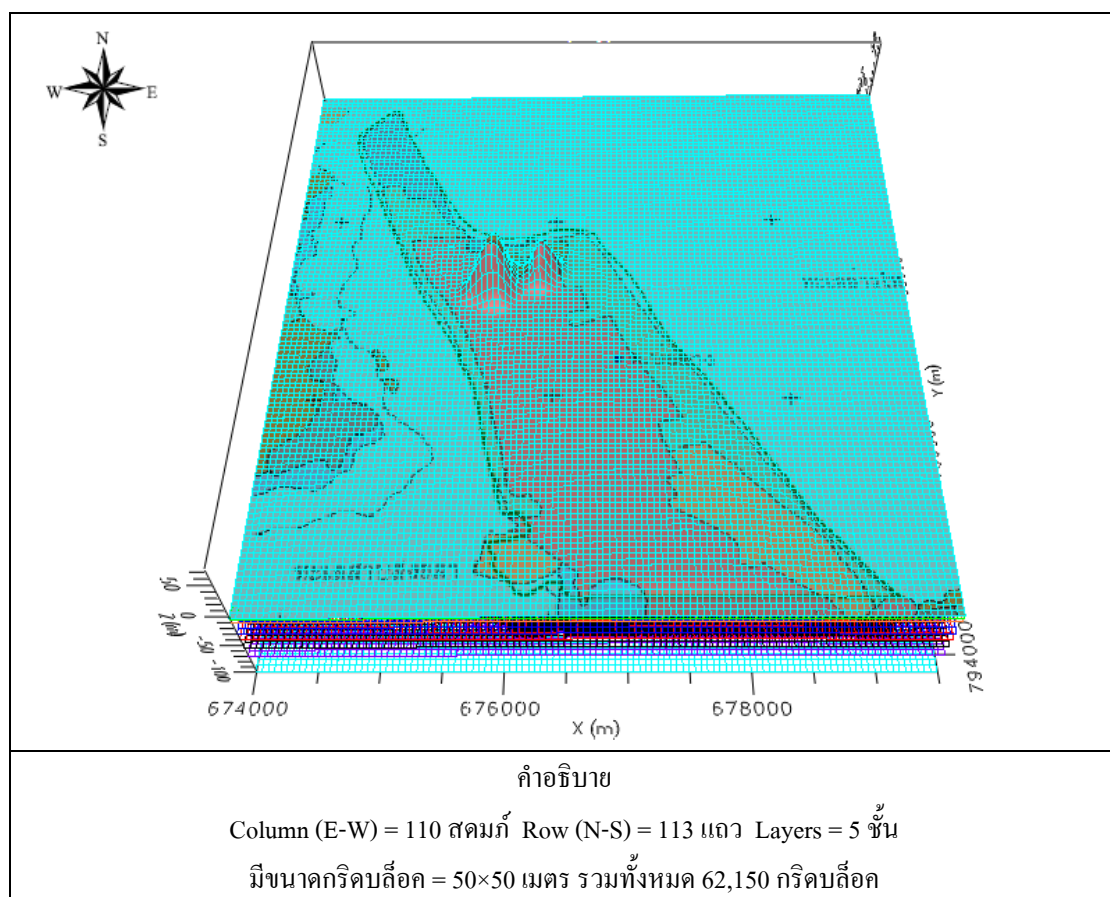


รูปที่ 5.3 กรณีจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของน้ำเค็ม

5.4.1 การออกแบบกริด (Grid Design)

พื้นที่ในการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเทศบาลนครสงขลา มีขนาดประมาณ 31 ตารางกิโลเมตร มีความกว้าง 5.5 กิโลเมตร ตามแนวตะวันออกถึงตะวันตก จากพิกัด UTM 794,000 ถึง 679,500 E และมีความยาว 5.65 กิโลเมตร ตามแนวเหนือ-ใต้ จากพิกัด UTM 793,850 ถึง 799,550 N และมีความสูงของระดับภูมิประเทศตั้งแต่ 80 เมตร (รทก.) จนถึง -100 เมตร (รทก.) ดังแสดงในรูปที่ 5.4

ในการจำลองได้แบ่งพื้นที่แบบจำลองเป็นกริดบล็อกขนาดเล็ก โดยแบ่งแนวตะวันออก-ตะวันตกเป็น 110 สดมภ์ แนวเหนือ-ใต้เป็น 113 แถว โดยกริดบล็อกมีขนาด 50×50 เมตร และแบ่งความสูงของพื้นที่เป็น 5 ชั้น รวมทั้งหมด 62,150 กริดบล็อก (ไม่รวมชั้นหินแข็ง) ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.4 การออกแบบกริดแบบจำลอง

ตารางที่ 5.1 การกำหนดรายละเอียดของแบบจำลอง

รายการกำหนด	ค่ากำหนดในแบบจำลอง
1) ขนาดแบบจำลองในพื้นที่ศึกษา	
ความกว้างพิกัด UTM ตะวันออก	674,000 ถึง 679,500 m.
ความสูงพิกัด UTM เหนือ	793,850 ถึง 799,500 m.
ระดับภูมิประเทศ (รทก.)	-100 ถึง +80 m.
2) ขนาดความละเอียดของแบบจำลอง	
จำนวนสดมภ์ (column)	110 ช่อง
จำนวนแถว (row)	113 ช่อง
จำนวนชั้น (layer)	5 ชั้น
ขนาดกริดบล็อก	50×50 เมตร
จำนวนกริดบล็อกในแต่ละชั้น	62,150 กริดบล็อก
3) การจัดแบ่งชั้นในแบบจำลอง	
ชั้นน้ำสมิหลา	ชั้นที่ 1
ชั้นน้ำบ่อยาง	ชั้นที่ 3
ชั้นน้ำสงขลา (Songkhla aquifer)	ชั้นที่ 5
ชั้นดินเหนียว (aquitard)	ชั้นที่ 2,4
ชั้นที่กำหนดให้ไม่มีการไหลของน้ำ (inactive)	ชั้นที่ 6
4) หน่วยที่ใช้ในแบบจำลอง (ระบบเมตริก)	
ระยะทาง – length	เมตร – meters
เวลา - time	วัน – day
ความนำคลศาสตร์ – conductivity	เมตร / วินาที – m/sec
อัตราการสูบน้ำ – pumping rate	ลบ.ม./วัน – m ³ /day
การเพิ่มเติมน้ำ – recharge	มม./ปี – mm./year
มวล – mass	กก. – kg
ความเข้มข้น - concentration	มิลลิกรัม/ลิตร – mg/liter
5) ค่ากำหนดวันในแบบจำลอง	
วันที่เริ่มต้นของแบบจำลอง	1 กันยายน 2551
วันที่เทียบเคียงในแบบจำลองเริ่มต้น (1 กันยายน 2551)	0
วันที่เทียบเคียงในแบบจำลองสิ้นสุด (31 สิงหาคม 2552)	365
6) จำนวนบ่อบาดาล	
บ่อสูบน้ำ (บ่อลึกและบ่อตื้น)	256 บ่อ
บ่อสังเกตการณ์	8 บ่อ

5.4.2 การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง (Boundary Condition)

การกำหนดสภาพขอบเขตของแบบจำลอง พิจารณาจากลักษณะทางกายภาพ (Physical boundary) ได้แก่ เทือกเขา ภูเขา ทะเล และขอบเขตอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา รายละเอียดการกำหนดขอบเขตแบบจำลองการไหลและการแพร่กระจายของน้ำเค็มดังแสดงในตารางที่ 5.2

5.4.3 สภาพขอบเขตและช่วงเวลาการคำนวณ (Time Step and Stress Period)

ช่วงเวลาของการจำลองเป็นตัวกำหนดระยะเวลาของการจำลองและพารามิเตอร์ที่จะนำเข้าสู่แบบจำลอง ในการศึกษาคั้งนี้กำหนดช่วงเวลาการคำนวณเป็นรายเดือนจำนวน 120 เดือน ส่วนขั้นเวลาการคำนวณซึ่งเป็นเวลาย่อยของช่วงเวลา กำหนดให้ 1 ช่วงเวลาของการคำนวณมี 5 ขั้น เวลาการคำนวณ คิดเป็น 600 ช่วงเวลา (Time step) จำนวนวันจำลองเท่ากับ 3,650 วัน (พ.ศ. 2543 ถึง 2552) จะได้ว่าใช้เวลา 1 ขั้น (Stress period) ประมาณ 6 วัน

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดการกำหนดขอบเขตแบบจำลอง (Boundary Condition)

ขอบเขตแบบจำลอง	รายละเอียด
ทิศเหนือ ทิศตะวันออก และ ทิศตะวันตก	แนวทะเลอ่าวไทยและทะเลสาบสงขลากำหนดให้เป็น 1. Constant Head Boundary คือ กำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินคงที่ตลอดเวลา (0 ม. รทก.) เฉพาะชั้นบนสุด 2. Constant concentration คือ ขอบเขตความเข้มข้นคงที่ตลอดเวลาเท่ากับ 16,000 mg/L ที่ทะเลสาบสงขลาและ เท่ากับ 18,000 mg/L ที่ทะเลอ่าวไทย ตามลำดับ
ทิศใต้	เป็นเป็นเขตติดกับภูเขา (เขารูปช้าง) กำหนดเป็นขอบเขตที่น้ำไหลผ่าน (Specified Flux)
ด้านบน	เป็นขอบเขตที่มีการเพิ่มเติมน้ำ (Recharge Boundary) คิดประเมินเป็น 45 % ของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี (จากการประเมินในหัวข้อ 3.2) ตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดชั้นหินอุ้มน้ำ และความลาดชันของพื้นที่ โดยกำหนดเฉพาะชั้นที่ 1 ของแบบจำลอง)
ด้านล่าง	กำหนดเป็นขอบเขตที่น้ำไม่ไหลผ่าน (No Flow Boundary)

5.5 การจำลองการไหลในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient State Modeling)

การจำลองการไหลในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เป็นการจำลองที่มีความสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ทั้งนี้เพราะเป็นการจำลองตามต้นทุนน้ำที่ขึ้นอยู่กับฤดูกาล นอกจากนี้ยังสามารถใช้จำลองการสูบน้ำเพื่อประเมินศักยภาพน้ำบาดาล (Groundwater potential assessment) ในอนาคตได้ ข้อมูลที่นำเข้าแบบจำลองมีรายละเอียดต่อไปนี้

5.5.1 อัตราการเติมน้ำ (Recharge Rate)

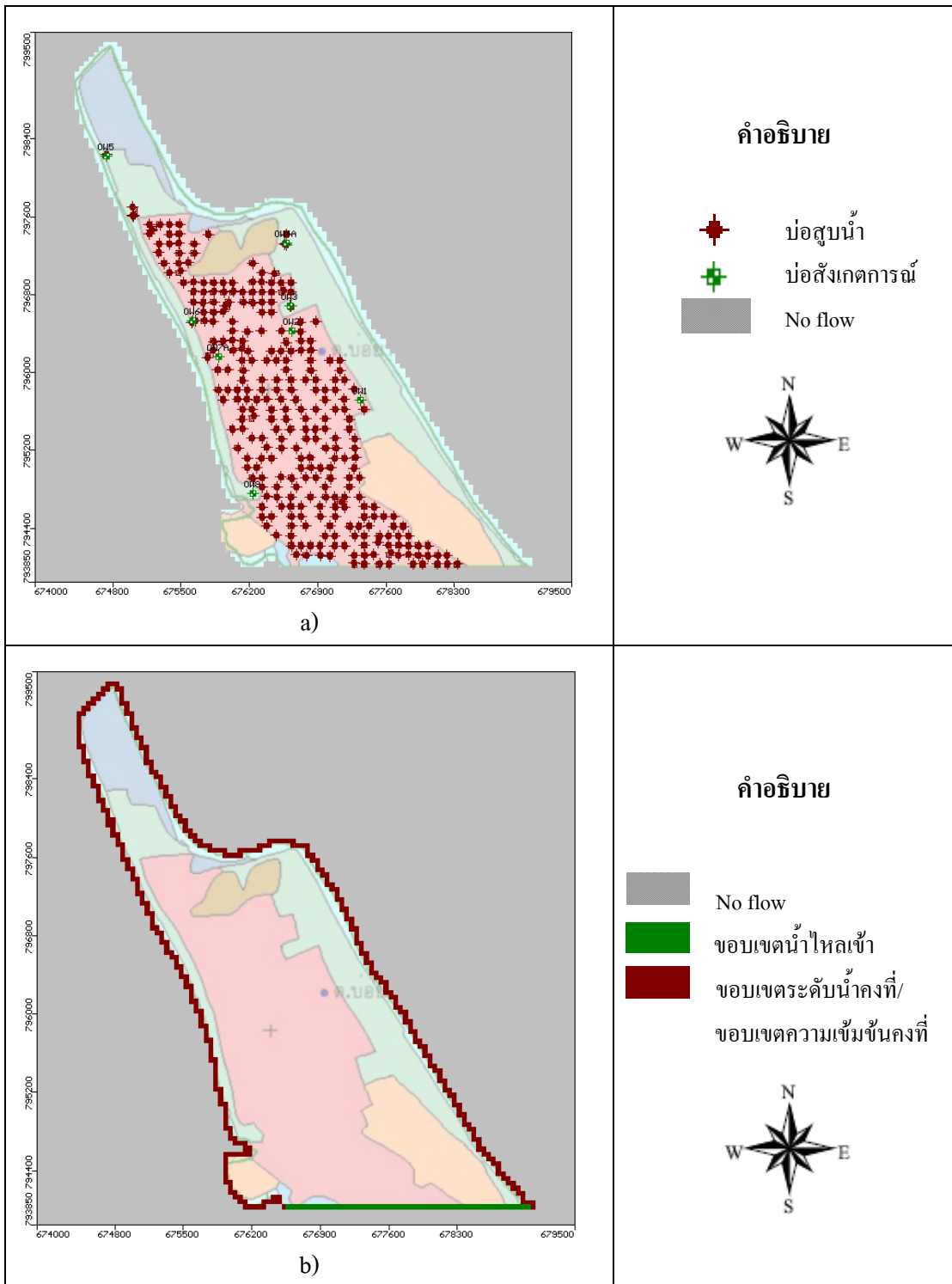
พิจารณาจากปัจจัยที่มีผลต่อการเติมน้ำ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อัตราการระเหย ปริมาณน้ำท่า ลักษณะของดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน และความสูงต่ำของภูมิประเทศ โดยนำข้อมูลทั้งหมดมาพิจารณาร่วมกัน และทำการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ในการจำลอง โดยได้แจกแจงอัตราการเติมน้ำให้อยู่ในช่วงที่ฝนตกชุก คือ เดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม โดยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝน และอัตราการคายระเหยในช่วงเวลานั้น ปริมาณการเติมน้ำที่แจกแจงสำหรับนำเข้าแบบจำลองแสดงในตาราง 5.3 โดยภาพรวมมีอัตราการเติมน้ำเป็น 902 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 45 % ของปริมาณฝนทั้งหมด

5.5.2 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ (Flow Property)

คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage coefficient) และความพรุน (Porosity) ซึ่งได้กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวตั้งต่อแนวราบ เท่ากับ 1:10 ซึ่งผลจากการปรับเทียบค่าตัวแปรในสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแสดงในตารางที่ 5.4

5.5.3 ระดับแรงดันน้ำเริ่มต้น (Initial Head)

ระดับน้ำเริ่มต้นที่ใช้ในการจำลองใช้ค่าระดับแรงดันน้ำเฉลี่ยตั้งแต่ พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2552 ซึ่งได้จากการวัดในภาคสนาม (แสดงในภาคผนวก ค) โดยชั้นน้ำสมิหลามีช่วงข้อมูลของระดับน้ำคือ 0.73 ถึง 2.10 เมตร ส่วนชั้นน้ำบ่อขังมีช่วงข้อมูลของระดับน้ำคือ 0.6 ถึง 2.88 เมตร



รูปที่ 5.5 ตำแหน่งบ่ออาคารและขอบเขตของแบบจำลอง

(a) บ่อสูบน้ำอาคารและบ่อสังเกตการณ์ (b) การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง

5.5.4 การใช้น้ำบาดาล (Groundwater Usage)

การประเมินการใช้น้ำบาดาล (หัวข้อ 3.3) พบว่า พื้นที่ศึกษามีอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยประมาณ 1,263 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (461,025 ลูกบาศก์เมตรต่อปี) ตำแหน่งบ่อสูบน้ำและบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 5.5

ตารางที่ 5.3 ปริมาณการเพิ่มเติมน้ำการจำลองในสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

เดือน	ปริมาณการเพิ่มเติมน้ำรายเดือน (มิลลิเมตร)
มกราคม	0
กุมภาพันธ์	0
มีนาคม	0
เมษายน	0
พฤษภาคม	0
มิถุนายน	0
กรกฎาคม	0
สิงหาคม	0
กันยายน	0
ตุลาคม	129
พฤศจิกายน	433
ธันวาคม	340
รวม	902

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์ของชั้นน้ำที่ได้จากการปรับเทียบ (Calibrated parameter)

Aquifer	Hydraulic conductivity			Storage		Porosity	
	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	Ss (1/m)	Sy	Eff. Por.	Tot. Por.
ชั้นดินเหนียว	2-e08	2-e08	2-e08	0.0026	-	0.03	0.42
ชั้นน้ำสมิหลา	3.67e-05	3.67e-05	3.67e-06	-	0.16	0.28	0.35
ชั้นน้ำบ่อยาง	5.75e-06	5.75e-06	5.75e-07	0.0002	-	0.25	0.32
ชั้นน้ำสงขลา	6.32e-06	6.32e-06	6.32e-07	0.0001	-	0.25	0.32

หมายเหตุ	K_x, K_y และ K_z	= ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ ในแนวแกน x, y และ z
	Ss	= ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะ
	Sy	= ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน
	Eff. Por	= Effective Porosity
	Tot. Por	= Total Porosity

5.6 การจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม (Mass Transport Modeling)

การจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม ได้จำลองในช่วงเวลาที่มีการตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาลเดือนกันยายน 2551 ถึง เดือนสิงหาคม 2552 แล้วทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้ให้สอดคล้องกับปริมาณคลอไรด์ที่วัดได้ในสนาม การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำเค็มมี 2 วิธี คือ

1) กรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ (Constant density) โดยการใช้โปรแกรม MT3D ในการคำนวณและ

2) กรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Variable density) โดยการใช้โปรแกรม SEAWAT ในการคำนวณ

การจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มทั้ง 2 วิธีนั้นมีการนำเข้าข้อมูลเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

5.6.1 ความเข้มข้นคลอไรด์เริ่มต้น (Initial Chloride Concentration)

ความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นที่ใช้ในการจำลองใช้ค่าปริมาณคลอไรด์เฉลี่ยที่ได้จากการวัดในภาคสนามตั้งแต่เดือนกันยายน พ.ศ. 2551 ถึง เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2552 (แสดงในภาคผนวก ก) โดยชั้นน้ำบ่ออย่างมีช่วงข้อมูลปริมาณคลอไรด์คือ 10.76 ถึง 63.38 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนชั้นน้ำบ่ออย่างมีช่วงข้อมูลปริมาณคลอไรด์คือ 12.17 ถึง 2,930.37 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในการนำเข้าข้อมูลความเข้มข้นคลอไรด์เริ่มต้นซึ่งนอกเหนือจากค่าปริมาณคลอไรด์เฉลี่ยที่วัดได้ในสนามแล้วยังได้มีการนำเข้าข้อมูลโดยการกำหนดรอยต่อระหว่างน้ำจืดกับน้ำเค็มโดยใช้หลักความสัมพันธ์ของน้ำจืดและน้ำเค็มในชั้นน้ำบริเวณชายฝั่งที่เรียกว่า Ghyben-Herzberg Relation ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.4 มาเป็นตัวกำหนดความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นด้วย

5.6.2 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำ (Dispersivity, α)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวราบและแนวตั้ง อ้างอิงจากชนิดของหินที่ได้มีการการศึกษาของ Domenico and Schwartz (1998) โดยค่าการแพร่กระจายในแนวตั้งมีค่าประมาณ 10% ของการแพร่กระจายในแนวราบ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวราบ (Longitudinal dispersivity) ที่ปรับเทียบค่าแล้วแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำจากการปรับเทียบ

ชั้นหินอุ้มน้ำ	Longitudinal dispersivity, α_L (m)
ดินเหนียว	1
ชั้นน้ำสมิหลา	10
ชั้นน้ำบ่อยาง	15
ชั้นน้ำสงขลา	13

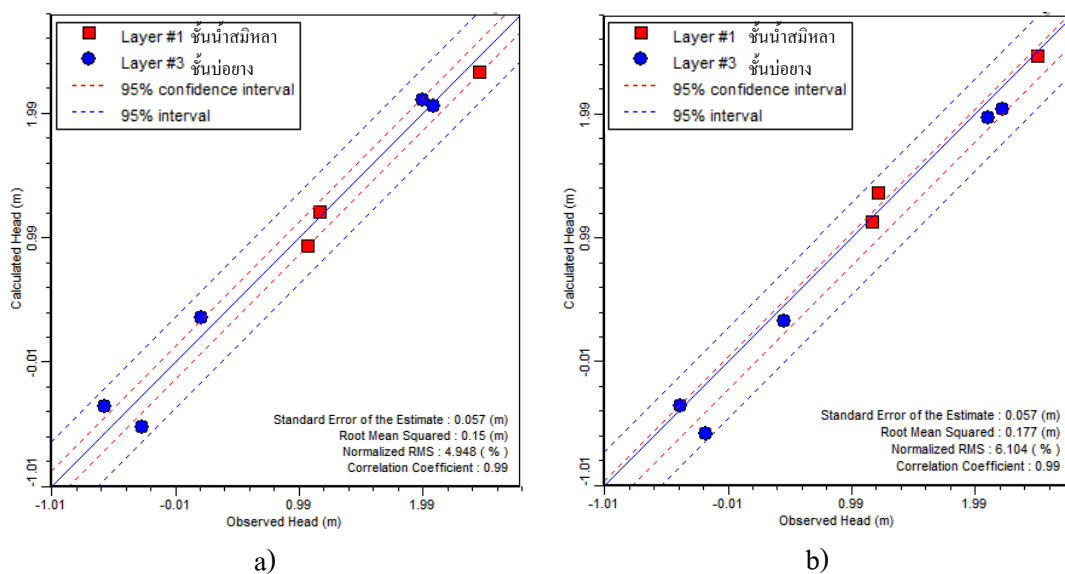
5.7 การปรับเทียบและตรวจสอบยืนยันแบบจำลอง (Model Calibration and Verification)

การปรับเทียบค่าตัวแปร เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน อัตราการเติมน้ำ และสัมประสิทธิ์การกักเก็บ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในสนามสอดคล้องกัน ณ สถานที่และเวลานั้นๆ ซึ่งการปรับแก้ค่าตัวแปรจะเป็นในลักษณะลองผิดลองถูก (Trial-and-error adjustment) จนกระทั่งทราบขอบเขตและช่วงค่าของตัวแปรต่างๆ เพื่อตรวจสอบแบบจำลอง ซึ่งในการจำลองจะทำการจำลองเป็นระยะเวลาเวลา 10 ปี แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดในสนามมาเปรียบเทียบกับค่าที่โปรแกรมคำนวณได้ในปีที่ 10 เพื่อผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีความถูกต้องและสามารถนำมาใช้งานได้

5.7.1 การไหลในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในการจำลองแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่นำเข้าแบบจำลอง จนค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณและที่วัดได้ในสนามอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ พารามิเตอร์ที่มีการปรับค่า ได้แก่ อัตราการเพิ่มเติมน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นหิน

อุ้มน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ตั้งเกณฑ์ความแตกต่างของระดับน้ำด้วยค่าความเบี่ยงเบนคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) ไว้ที่ร้อยละ 10 นั่นคือถ้าผลต่างระดับน้ำที่คำนวณได้กับที่วัดได้ในสนามมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ถือว่าผลการจำลองนั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่มีความน่าเชื่อถือยอมรับได้ได้แสดงในรูปที่ 5.6 และสรุปผลการเปรียบเทียบได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการไหลแบบสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลาในปีที่ 10 (a) กตุร้อน ณ วันที่ 3,465 (b) กตุฝน ณ วันที่ 3,641

ตารางที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการไหลแบบสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

Calibrated value	Time	
	วันที่ 3,465	วันที่ 3,641
Standard error of the estimate, m	0.057	0.057
Root mean squared, m	0.15	0.177
Normalized RMS, %	4.948	6.104

ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน พิจารณาช่วงที่มีการตรวจวัดระดับน้ำ (กันยายน 2551 ถึง สิงหาคม 2552) พบว่า ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนในช่วงกตุร้อน

(วันที่ 3,465) ร้อยละ 4.948 และ ในช่วงฤดูฝน (วันที่ 3,641) ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อน ร้อยละ 6.104 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 10 นั่นคือ แบบจำลองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.7.2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม

ในการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม ได้มีการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ นำเข้าแบบจำลองจนปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณและที่วัดได้ในสนามอยู่ในช่วงที่ยอมรับ ได้ พารามิเตอร์ที่มีการปรับค่าได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำ (Dispersivity) โดย ตั้งเกณฑ์ความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ด้วยค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) ไว้ที่ร้อยละ 10 นั่นคือถ้าผลต่างปริมาณคลอไรด์ที่คำนวณได้กับที่วัดได้ในสนามมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ถือว่าผลการจำลองนั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

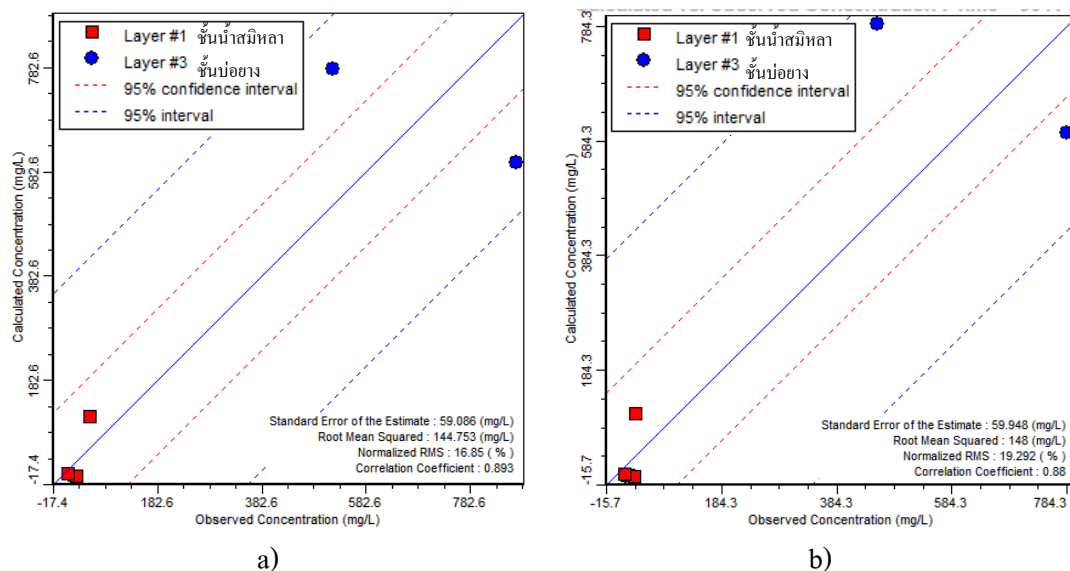
1) กรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ (Constant density)

ผลการปรับเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ พิจารณา ช่วงที่มีการตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาล (กันยายน 2551 ถึง สิงหาคม 2552) พบว่า เมื่อไม่นำค่า ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ที่ 5 (OW5) ซึ่งมีค่าที่วัดได้ในสนามกับค่าที่คำนวณได้ต่างกัน มากผิดปกติมาคำนวณหาจะได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนในช่วงฤดูร้อน (วันที่ 3,465) ร้อย ละ 16.85 และ ในช่วงฤดูฝน (วันที่ 3,641) ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 19.29 แสดงว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ได้ตั้งเอาไว้จากที่กล่าวมาข้างต้น แต่ เนื่องจากข้อมูลภาคสนามที่มีจำกัดและการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นที่มีงบประมาณจำกัด จึงอนุโลมให้ใช้ค่าปรับแก้ที่น้อยที่สุดที่ได้ไปก่อน

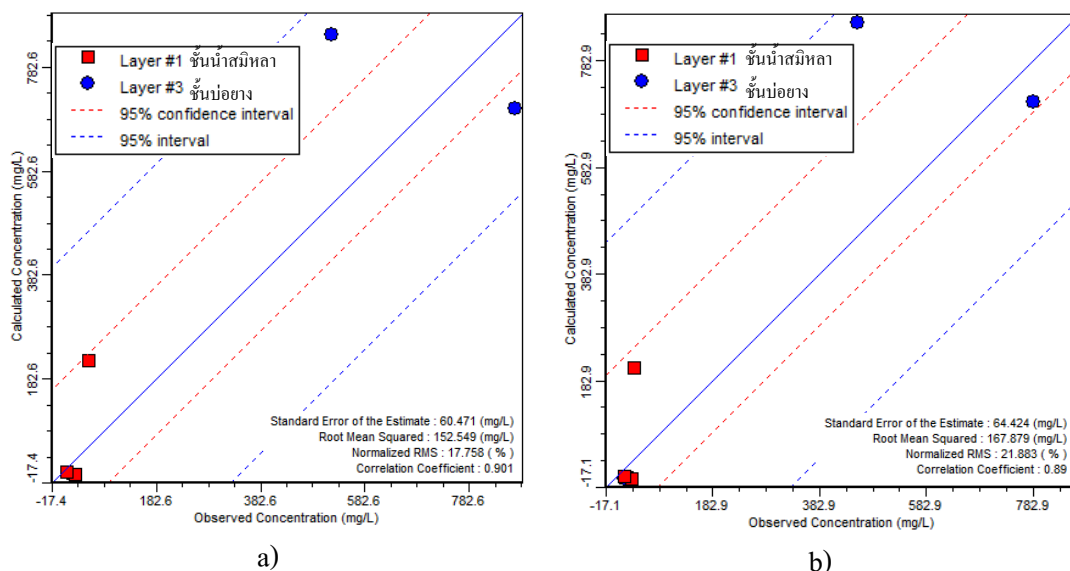
2) กรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Variable density)

ผลการปรับเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ พิจารณา เช่นเดียวกับกรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ พบว่าค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนในช่วงฤดู ร้อน (วันที่ 3,465) ร้อยละ 17.76 และ ในช่วงฤดูฝน (วันที่ 3,641) ได้ค่าความเบี่ยงเบนความ คลาดเคลื่อนร้อยละ 21.88 แสดงว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ได้ตั้ง เอาไว้จากที่กล่าวมาข้างต้น แต่เนื่องจากข้อมูลภาคสนามที่มีจำกัดและการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษา

เบื้องต้นที่มีงบประมาณจำกัดจึงอนุญาตให้ใช้ค่าปรับแก้ที่น้อยที่สุดที่ได้ไปก่อนเช่นกัน ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มทั้ง 2 กรณีแสดงไว้ในรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ และสรุปค่าที่เปรียบเทียบค่าแล้วแสดงไว้ใน ตารางที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีความหนาแน่นของน้ำคั่งที่ (a) ฤดูร้อน ณ วันที่ 3,465 (b) ฤดูฝน ณ วันที่ 3,641



รูปที่ 5.8 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คั่งที่ (a) ฤดูร้อน ณ วันที่ 3,465 (b) ฤดูฝน ณ วันที่ 3,641

ตารางที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม

Calibrated value	Constant density		Variable density	
	3,465 day	3641 day	3,465 day	3641 day
Standard error of the estimate, mg/L	59.09	59.95	60.471	64.42
Root mean squared, mg/L	144.75	148.0	152.55	167.88
Normalized RMS, %	16.85	19.29	17.76	21.88

5.8 ผลการจำลอง (Simulation Results)

ผลการจำลองประกอบด้วย การไหลในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา และการแพร่กระจายของน้ำเค็ม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.8.1 การไหลในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

5.8.1-1 ทิศทางการไหลของน้ำบาดาล

ผลจากจำลองการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยแบบจำลองถูกเปรียบเทียบโดยใช้ระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์จำนวน 8 บ่อ พบว่าทิศทางการไหลของน้ำบาดาลโดยทั่วไปจะไหลจากพื้นที่เติมน้ำทางทิศใต้ (เขารูปช้าง) มารวมกับน้ำจากพื้นที่รับน้ำ (Recharge) บริเวณกลางพื้นที่ศึกษาแล้วไหลออกทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกลงสู่ทะเลอ่าวไทยและทะเลสาบสงขลาตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ โดยช่วงของระดับน้ำในชั้นน้ำสมิหลาอยู่ระหว่าง 0 – 3.5 เมตร ชั้นน้ำบ่ออยู่ระหว่าง 0 – 3.0 เมตร และชั้นน้ำสงขลาอยู่ระหว่าง 0 – 3.0 เมตรเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ส่วนภาพตัดขวางแสดงทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินจะเห็นได้ว่า ที่พิกัดเดียวกันระดับน้ำของชั้นน้ำสมิหลาจะสูงกว่าชั้นน้ำบ่อและระดับน้ำของชั้นน้ำบ่ออยู่ก็จะสูงกว่าชั้นน้ำสงขลาตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.10

5.8.1-2 สมดุลน้ำบาดาล

สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปีจากการจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (ปี พ.ศ. 2552) ดังสรุปได้ในตารางที่ 5.8 พบว่ามีปริมาณน้ำไหลเข้าแบบจำลองมาจาก Recharge,

Storage, Specified flux และจาก Constant head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลเข้ารวมประมาณ 2,037,070 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองมาจาก Storage, Constant head, Well, และ Specified flux ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลออกรวมประมาณ 2,038,080 ลูกบาศก์เมตรต่อปี

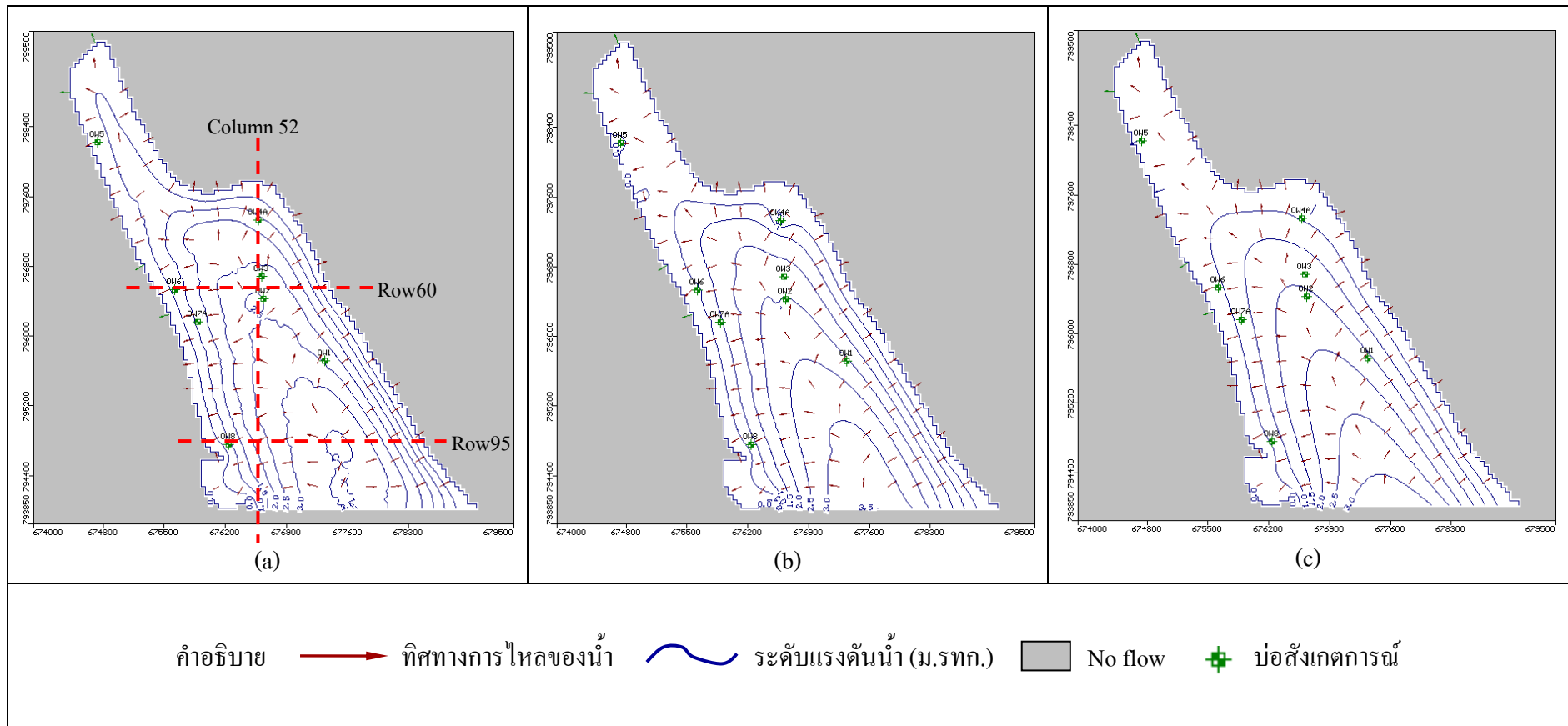
ตารางที่ 5.8 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปีจากการจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ลบ.ม./ปี)	ปริมาณการไหลออก(ลบ.ม./ปี)
Storage	841,795	850,279
Constant Head	1,534	842,696
Wells	0	335,070
Specified Flux	44,270	10,030
Recharge	1,149,460	0
Total	2,037,070	2,038,080
IN – OUT = -1,010 ลูกบาศก์เมตร Percent Discrepancy = 0.05 %		

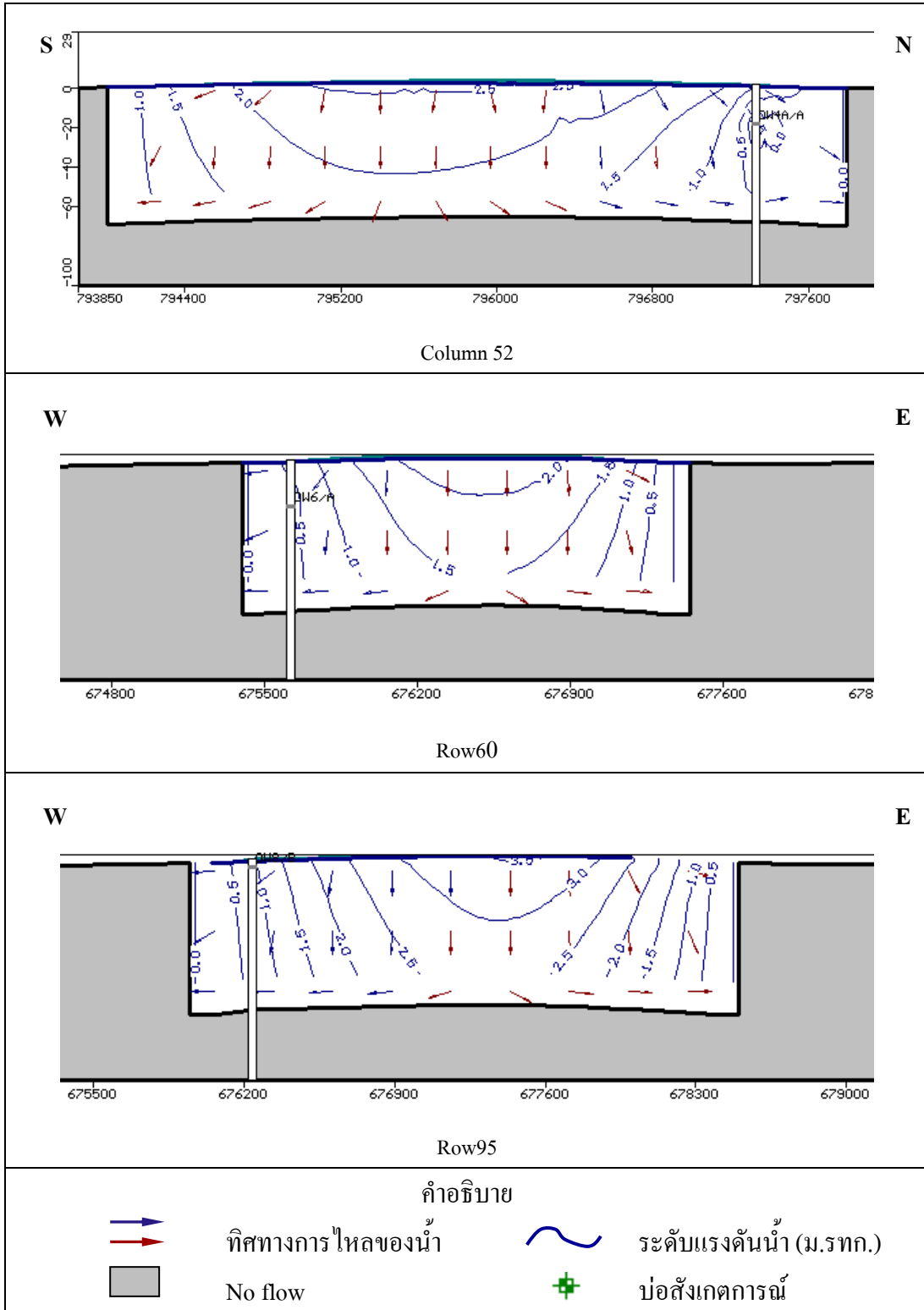
5.8.2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม

5.8.2-1 กรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ (Constant density)

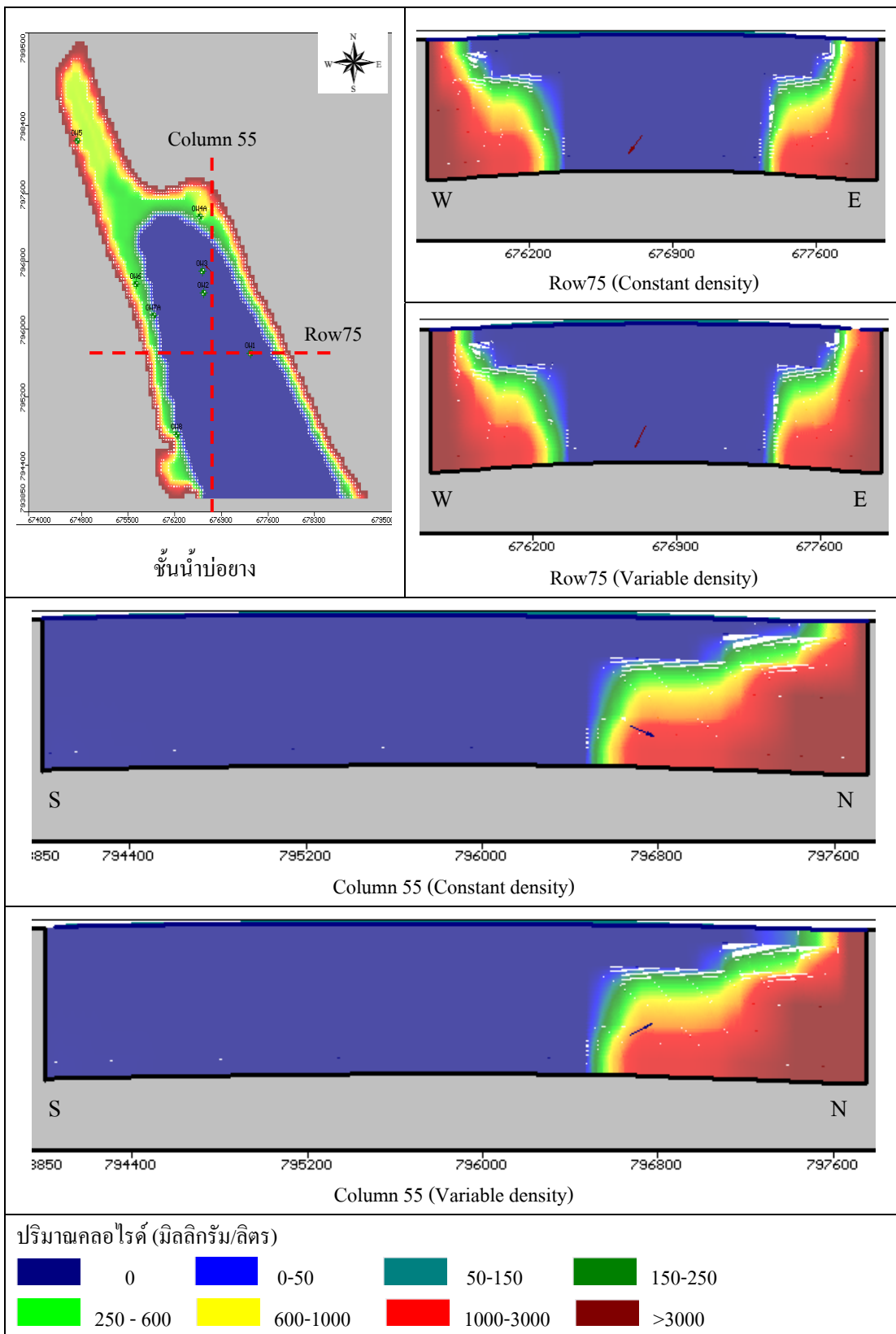
จากผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มในรูปความเข้มข้นของคลอไรด์กรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่พบว่าบริเวณที่มีการกระจายตัวของคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐานจะอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลอ่าวไทย ของชั้นน้ำบ่ออย่างและชั้นน้ำสงขลา ได้แก่ อนุสาวรีย์กรมหลวงชุมพร แหลมสนอ่อน หาดสมิหลา และหาดชลาทัศน์ ส่วนริมทะเลสาบสงขลา ได้แก่ บริเวณ สวนเสรี ศาลเจ้าพ่อหลักเมือง แต่เนื่องจากข้อมูลในภาคสนามของชั้นน้ำสงขลามีน้อย ผลการจำลองของชั้นน้ำชั้นนี้จึงมีความน่าเชื่อถือต่ำ ส่วนชั้นน้ำสมิหลาพบว่าปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี (เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม 250 มก./ล. เกณฑ์อนุโลมสูงสุด 600 มก./ล.) ทั้งนี้อาจเนื่องจากมีระดับน้ำ (Head) สูงกว่าชั้นน้ำบ่ออย่างและชั้นน้ำสงขลา ภาพการกระจายตัวของคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 5.9 ผลการจำลองแสดงทิศทางการไหลแบบสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (a) ชั้นน้ำสมิหลา (b) ชั้นน้ำบ่อยาง (c) ชั้นน้ำสงขลา (ธันวาคม 2551)



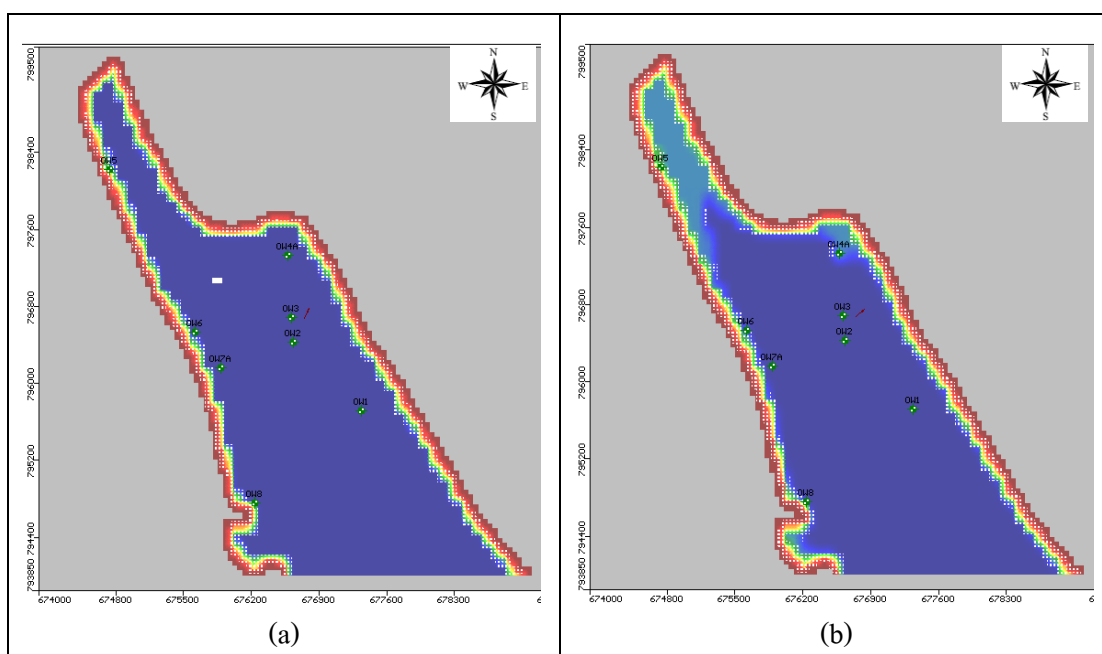
รูปที่ 5.10 ภาพตัดขวางแสดงทิศทางการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา



รูปที่ 5.11 ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มในรูปของคลอไรด์ในสภาวะการใช้น้ำในปัจจุบัน

5.8.2-2 กรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Variable density)

ผลการจำลองกรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่โดยรวมมีความคล้ายคลึงกับกรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่มาก ยกเว้นบริเวณทางทิศเหนือของชั้นน้ำสมิทธาเท่านั้นที่มีปริมาณคลอไรด์สูงกว่าในกรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ อาจเนื่องมาจากน้ำทะเลมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำจืด และบริเวณนี้มีระดับแรงดันน้ำใกล้เคียงกับระดับของน้ำทะเล (ประมาณ 0.5 เมตร) ทำให้มีแรงดันของน้ำจืดน้อย คลอไรด์จากน้ำทะเลจึงแพร่กระจายเข้ามาได้มากกว่าในกรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.12



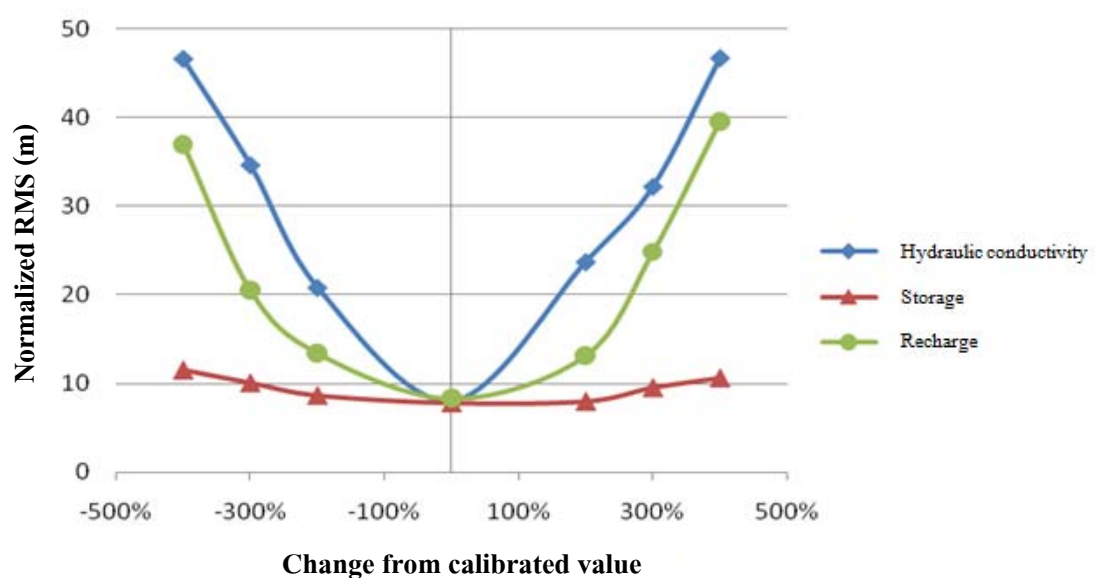
รูปที่ 5.12 ความแตกต่างระหว่างกรณี (a) ความหนาแน่นของน้ำคงที่ (b) ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ ในชั้นน้ำสมิทธา

5.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวทำโดยการเพิ่มลดพารามิเตอร์ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ และ อัตราการเพิ่มเติมน้ำปรับครั้งละ 100 % ของค่าสัมประสิทธิ์เดิม เปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับผลของชุดข้อมูลที่ปรับแก้แล้ว โดยพิจารณา

ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) เป็นหลัก แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์กับค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อน

ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองแสดงในรูปที่ 5.13 พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแบบจำลองมากที่สุด คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน อัตราการเพิ่มเติมน้ำตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บมีความอ่อนไหวต่ำ



รูปที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

5.10 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล (Groundwater Potential Assessment)

การประเมินศักยภาพของน้ำบาดาลในรูปของปริมาณการสูบน้ำที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของน้ำเค็ม ที่ปรับเทียบแล้วได้ผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่วัดในสนาม โดยมีค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) ไม่เกินร้อยละ 10 (ดังแสดงไว้ในหัวข้อ 5.7) จึงถือว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง และนำมาใช้ในการคาดคะเนระดับน้ำบาดาลและการแพร่กระจายในอนาคต

ในการประเมินปริมาณการสูบสูงสุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำบาดาล (Safe Yield) ได้กำหนดเงื่อนไขที่ยอมรับได้ในการจำลองดังนี้

1) ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำสมิหลาบริเวณเทศบาลนครสงขลา ต้องลดลงไม่เกิน 2 เมตร ในช่วงเวลา 10 ปี (ระดับน้ำบ่อต้นในพื้นที่ศึกษาอยู่ต่ำกว่าพื้นดินเฉลี่ยไม่เกิน 2 เมตร)

2) การรุกรานของคลอไรด์ที่มีปริมาณมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องไม่มากกว่า 100 เมตร จากตำแหน่งจุดปัจจุบัน

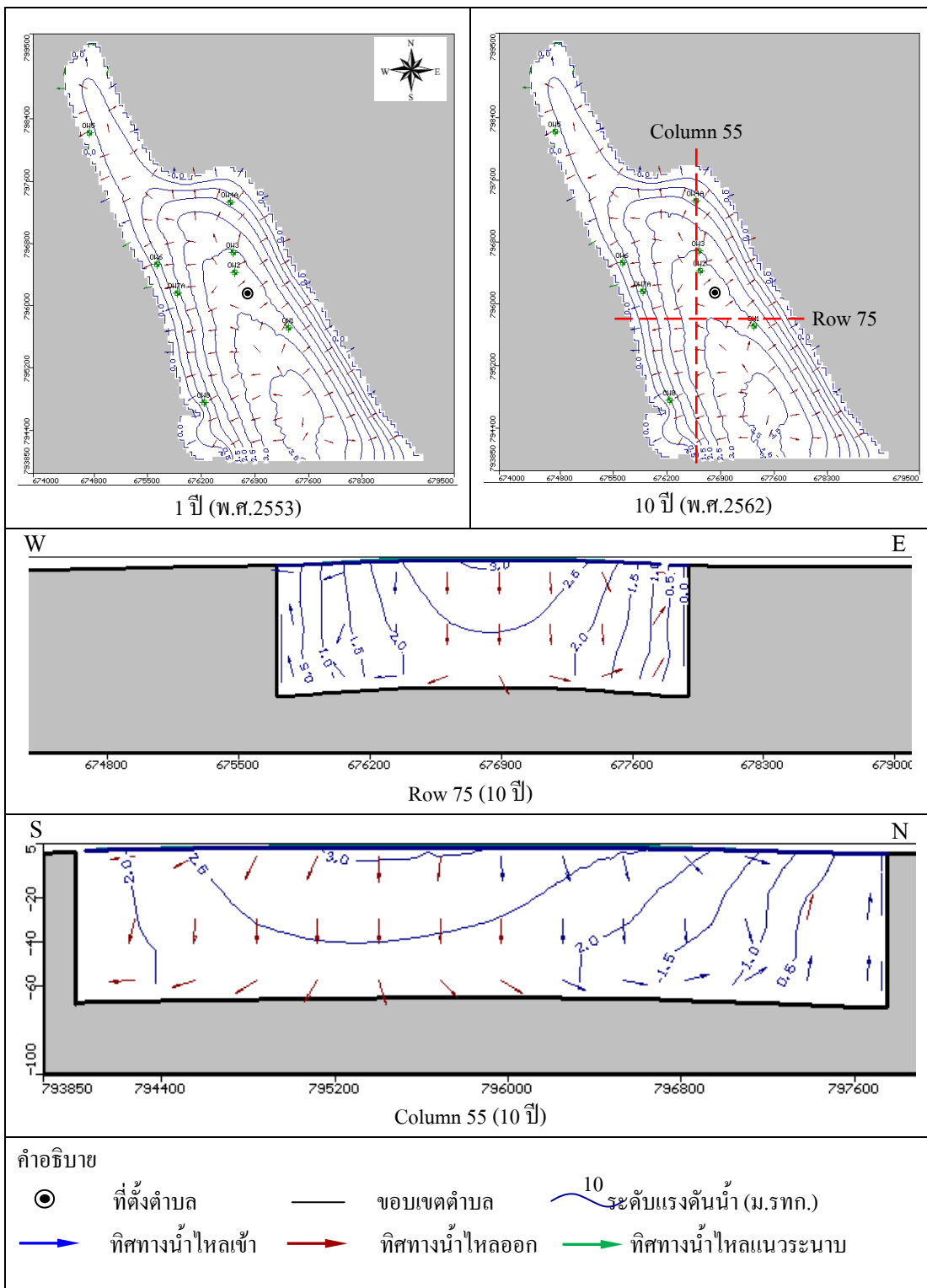
และได้ทำการจำลองเพื่อประเมินปริมาณการสูบสูงสุดในหลายกรณี (Scenario) ซึ่งประกอบด้วยกรณีจำลอง 3 กรณี ได้แก่

- 1) กรณีที่มีการใช้น้ำคงที่ในช่วงเวลา 10 ปี
- 2) กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วงเวลา 10 ปีและ
- 3) กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ในช่วงเวลา 10 ปี

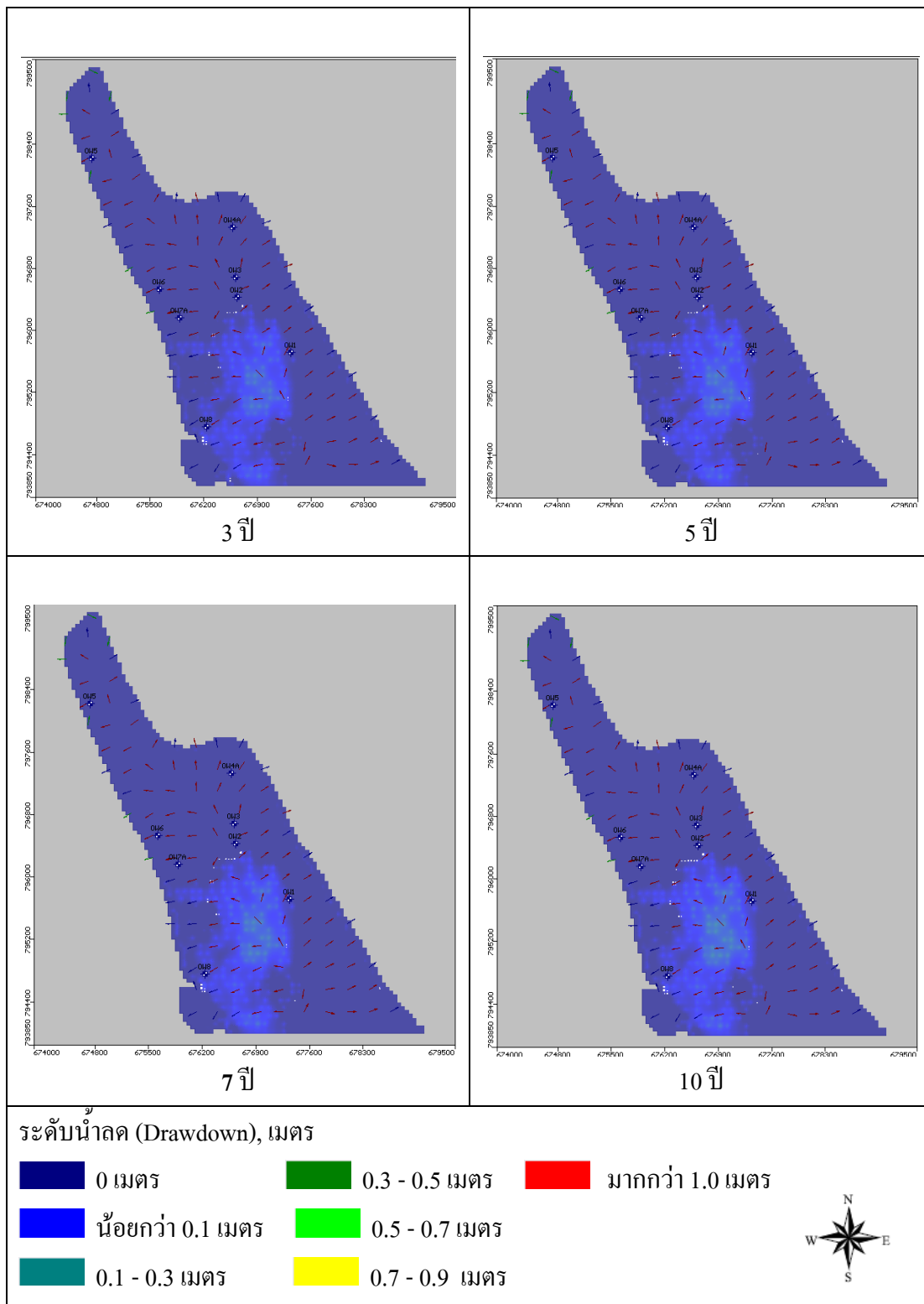
5.10.1 กรณีที่ 1 การใช้น้ำคงที่ในช่วงเวลา 10 ปี

การจำลองการไหลของน้ำบาดาลในกรณีที่ปริมาณการใช้น้ำคงที่ ในช่วง 10 ปี ข้างหน้า (จนถึง พ.ศ.2569) โดยมีอัตราการสูบน้ำ 335,070 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ผลการจำลองพบว่าทิศทางการไหลของน้ำบาดาลไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ น้ำจะไหลจากบริเวณกึ่งกลางของพื้นที่ไปยังทิศตะวันออกและทิศตะวันตกดังแสดงในรูปที่ 5.14 ส่วนการลดลงของระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำสมิหลาบริเวณกึ่งกลางของแบบจำลองมีค่าประมาณ 0.3 ถึง 0.5 เมตร ส่วนบริเวณอื่น ไม่มีการลดลงของระดับน้ำดังแสดงในรูปที่ 5.15

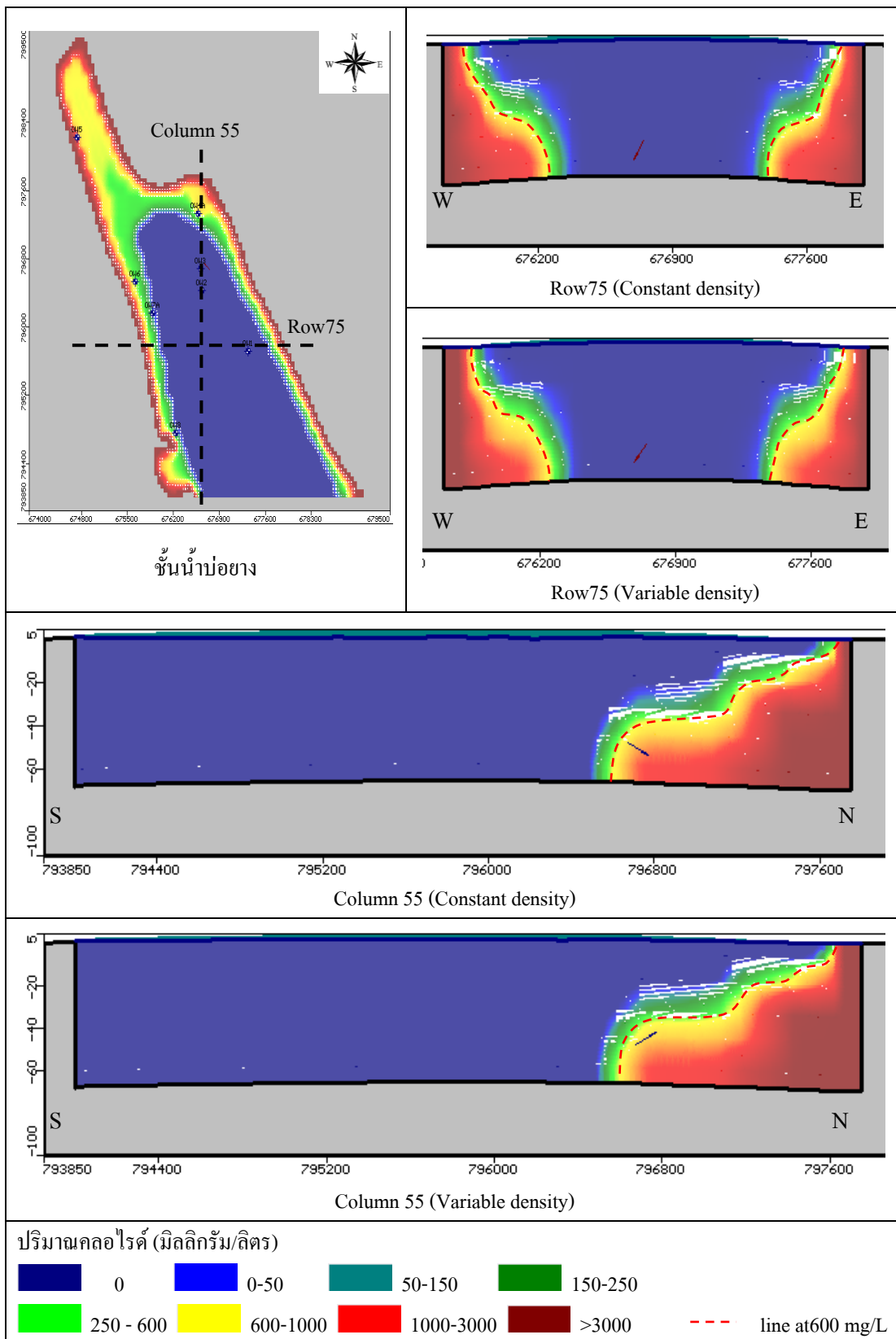
ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีที่มีการสูบน้ำคงที่ในช่วง 10 ปี ข้างหน้าทั้งในกรณี Constant density และกรณี Variable density พบว่าเกิดการแพร่กระจายของคลอไรด์เกิดขึ้นในพื้นที่ใกล้ทะเลอ่าวไทย และบริเวณริมทะเลสาบสงขลาของชั้นน้ำบ่ออย่าง และชั้นน้ำสงขลา ได้แก่ บริเวณอนุสาวรีย์กรมหลวงชุมพร แหลมสนอ่อน หาดสมิหลา หาดชลาทัศน์ และศาลเจ้าพ่อหลักเมือง แต่บริเวณใจกลางเมืองเทศบาลนครสงขลา มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอไรด์ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เนื่องจากข้อมูลในภาคสนามของชั้นน้ำสงขลามีน้อย ผลการจำลองของชั้นน้ำชั้นนี้จึงมีความน่าเชื่อถือต่ำ ส่วนชั้นน้ำสมิหลาพบว่ามีปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี ภาพแสดงการแพร่กระจายของน้ำเค็มดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.14 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่มีการใช้น้ำคงที่ ในเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553 -2562)



รูปที่ 5.15 ระดับน้ำลด (Drawdown) กรณีที่มีการใช้น้ำคงที่ ในเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)



รูปที่ 5.16 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่มีการใช้น้ำคังที่ ในเวลา 10 ปี (พ.ศ.2553-2562)

สมดุลน้ำบาดาลในกรณีที่ 1 ได้แสดงในตารางที่ 5.9 พบว่ามีปริมาณน้ำไหลเข้าแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยมาจาก Recharge, Storage, Specified flux และ Constant head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลเข้ารวมประมาณ 2,041,198 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยออกจาก Constant head, Storage, Well และ Specified flux ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลออกรวมประมาณ 2,042,177 ลูกบาศก์เมตรต่อปี

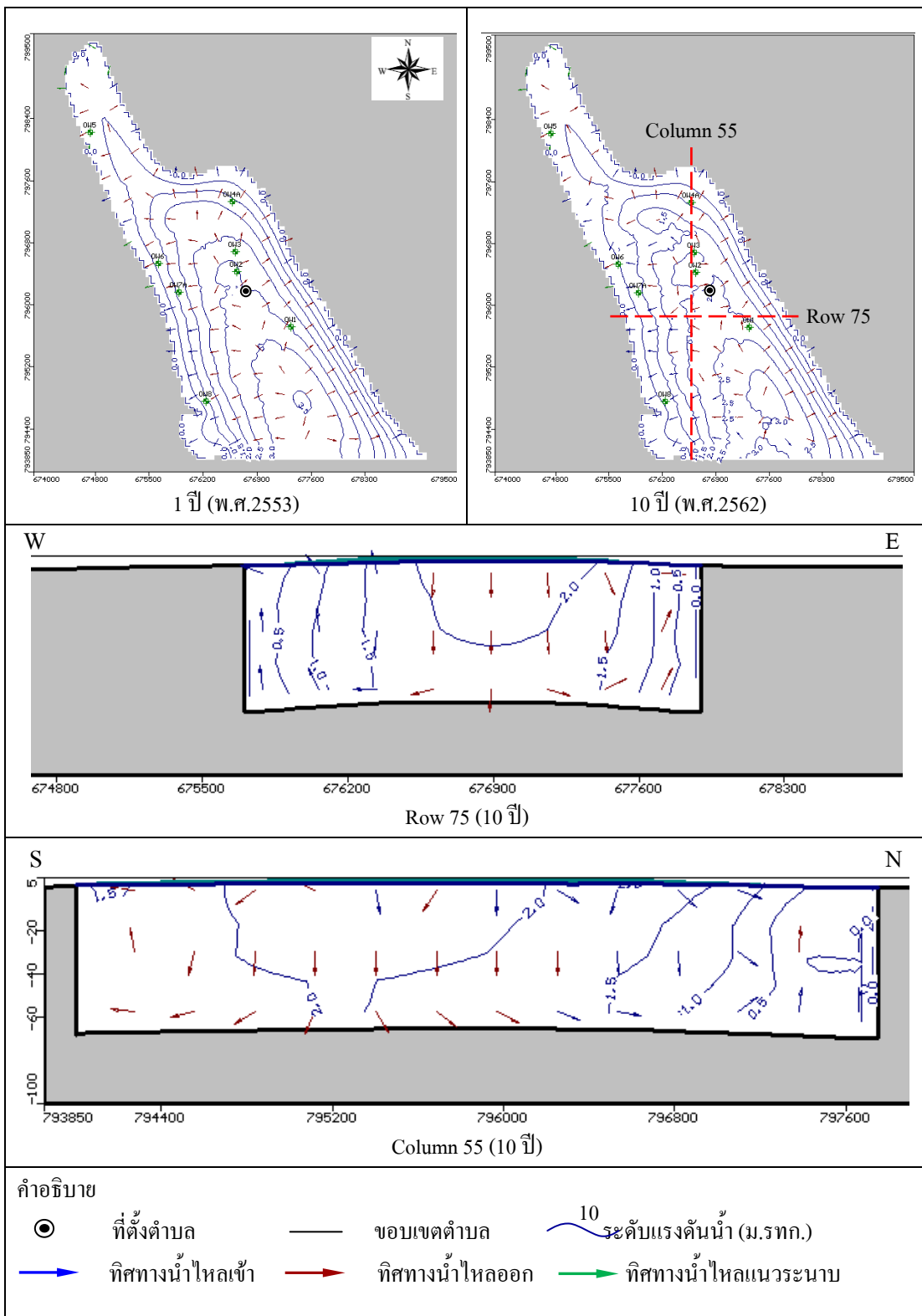
ตารางที่ 5.9 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่มีการใช้น้ำคงที่ ณ ช่วงเวลา 10 ปี

แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ลบ.ม./ปี)	ปริมาณการไหลออก (ลบ.ม./ปี)
Storage	846,630	847,540
Constant Head	1,532	849,320
Wells	0	335,070
Specified Flux	43,576	10,247
Recharge	1,149,460	0
Total	2,041,198	2,042,177

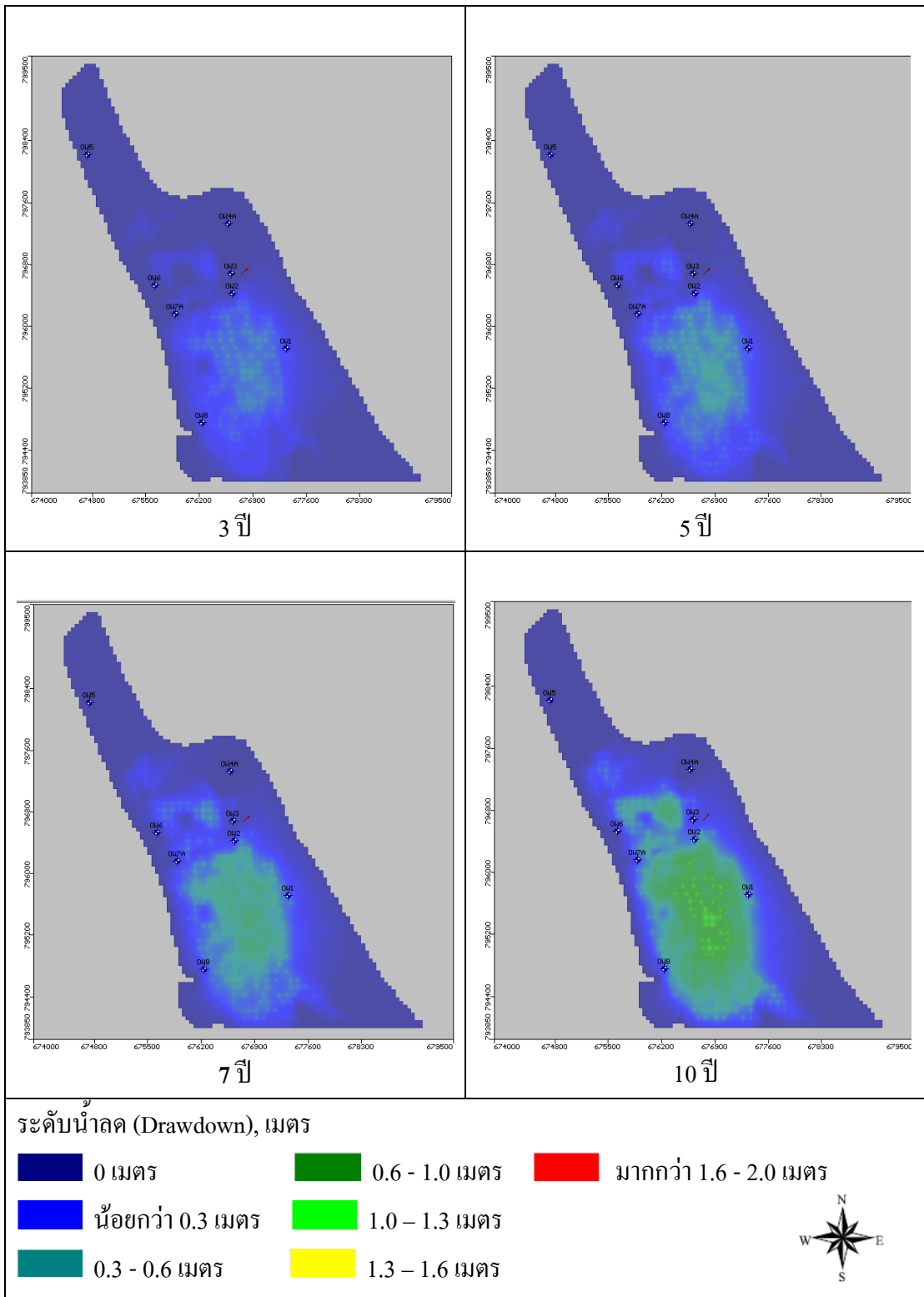
โดยสรุปผลการจำลองพบว่า ปริมาณการสูบน้ำที่เพิ่มขึ้น 5% ต่อปี ในช่วงเวลา 10 ปี ยังไม่มีผลกระทบต่อแหล่งน้ำบาดาล

5.10.2 กรณีที่ 2 การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในช่วงเวลา 10 ปี

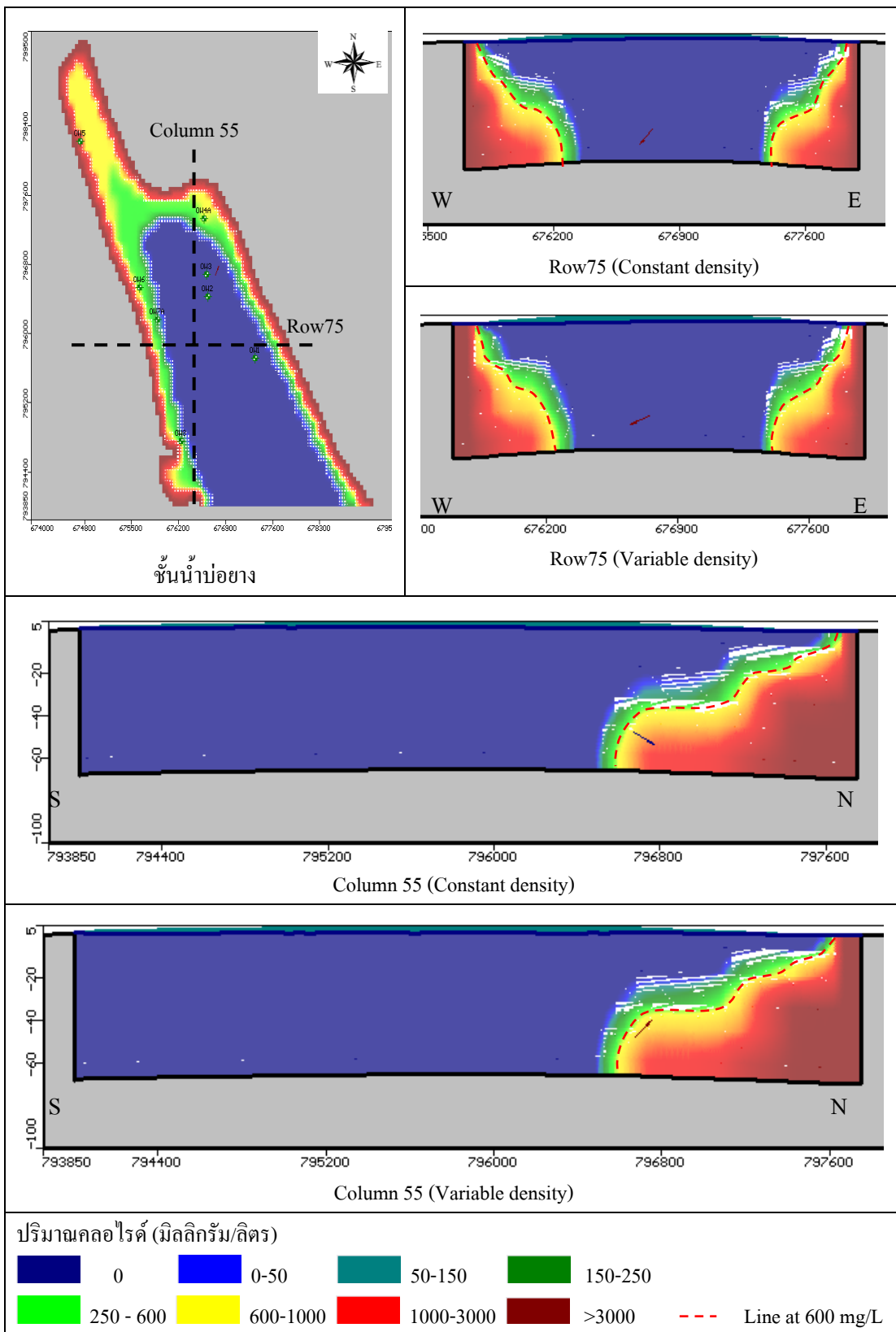
การจำลองการไหลของน้ำบาดาลในกรณีที่ปริมาณการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในช่วง 10 ปีข้างหน้า ผลการจำลองพบว่า ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินโดยรวมไม่มีการเปลี่ยนแปลงของทิศทางการไหลของน้ำมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.17 ส่วนการลดลงของระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำสมิหลาดังแสดงในรูปที่ 5.18 โดยพบว่าที่เวลา 3, 5, 7 และ 10 ปี เกิดระยะน้ำลดสูงสุดประมาณ 0.58, 0.70, 0.86 และ 1.19 เมตร ตามลำดับ รอบใจกลางเมืองเทศบาลนครสงขลา ส่วนบริเวณอื่น เช่น แหลมสนอ่อน หาดสมิหลา และ หาดชลาทัศน์ พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำอย่างมีนัยสำคัญ คือมีระยะน้ำลดสูงสุดน้อยกว่า 0.3 เมตร



รูปที่ 5.17 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)



รูปที่ 5.18 ระดับน้ำลด (Drawdown) กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)



รูปที่ 5.19 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)

ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีที่มีการสูบน้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในช่วง 10 ปี ข้างหน้าทั้งในกรณี Constant density และกรณี Variable density ได้แสดงการแพร่กระจายของน้ำเค็ม ดังในรูปที่ 5.19 พบว่า เกิดการแพร่กระจายของของคลอไรด์เข้าสู่พื้นที่เทศบาลนครสงขลามากขึ้นจากกรณีที่ 1 ทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้นประมาณ 100 - 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเกิดขึ้นในพื้นที่ใกล้ทะเลอ่าวไทย และริมทะเลสาบสงขลาของชั้นน้ำบ่ออย่างและชั้นน้ำสงขลา ได้แก่ บริเวณอนุสาวรีย์กรมหลวงชุมพร แหลมสนอ่อน สนามกอล์ฟทองใหญ่ หาดสมิหลา ด้านตรวจคนเข้าเมือง และท่าเทียบเรือ แต่แนวของคลอไรด์ที่มีปริมาณมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ยังไม่มีการเคลื่อนที่จากแนวปัจจุบัน (รูปที่ 5.11) แต่เนื่องจากข้อมูลในภาคสนามของชั้นน้ำสงขลามีน้อย ผลการจำลองของชั้นน้ำชั้นนี้จึงมีความน่าเชื่อถือต่ำ

สมดุลน้ำบาดาลในกรณีที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 5.10 พบว่ามีปริมาณน้ำไหลเข้าแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยมาจาก Recharge, Storage, Specified flux, และ Constant head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลเข้ารวมประมาณ 2,127,978 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยออกจาก Storage, Constant head, Well, และ Specified flux ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลออกรวมประมาณ 2,128,433 ลูกบาศก์เมตรต่อปี จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใช้น้ำเพิ่มมากขึ้น 5% (545,794 ลบ.ม./ปี) จะทำให้ปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่ทะเลน้อยลง (Constant head) และมีน้ำไหลเข้าจาก Storage มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการลดลงของระดับน้ำในแบบจำลอง

ตารางที่ 5.10 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ณ ช่วงเวลา 10 ปี

แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ลบ.ม./ปี)	ปริมาณการไหลออก (ลบ.ม./ปี)
Storage	930,688	824,495
Constant Head	4,274	747,897
Wells	0	545,794
Specified Flux	43,576	10,247
Recharge	1,149,440	0
Total	2,127,978	2,128,433

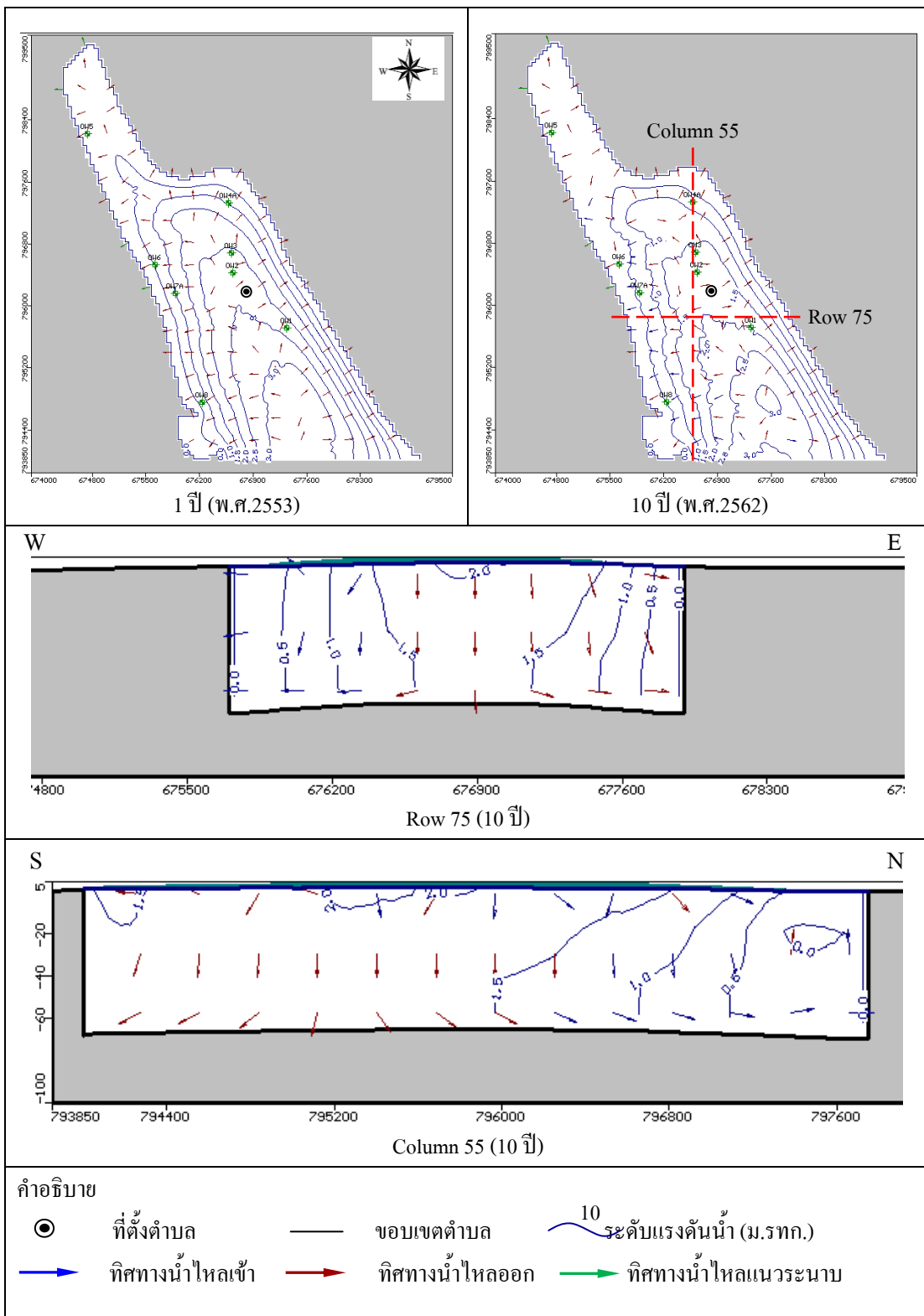
โดยสรุปผลการจำลองพบว่า ปริมาณการสูบน้ำที่เพิ่มขึ้น 5% ต่อปี ในช่วงเวลา 10 ปี ยังไม่มีผลกระทบต่อแหล่งน้ำบาดาล

5.10.3 กรณีที่ 3 การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 10 ปี

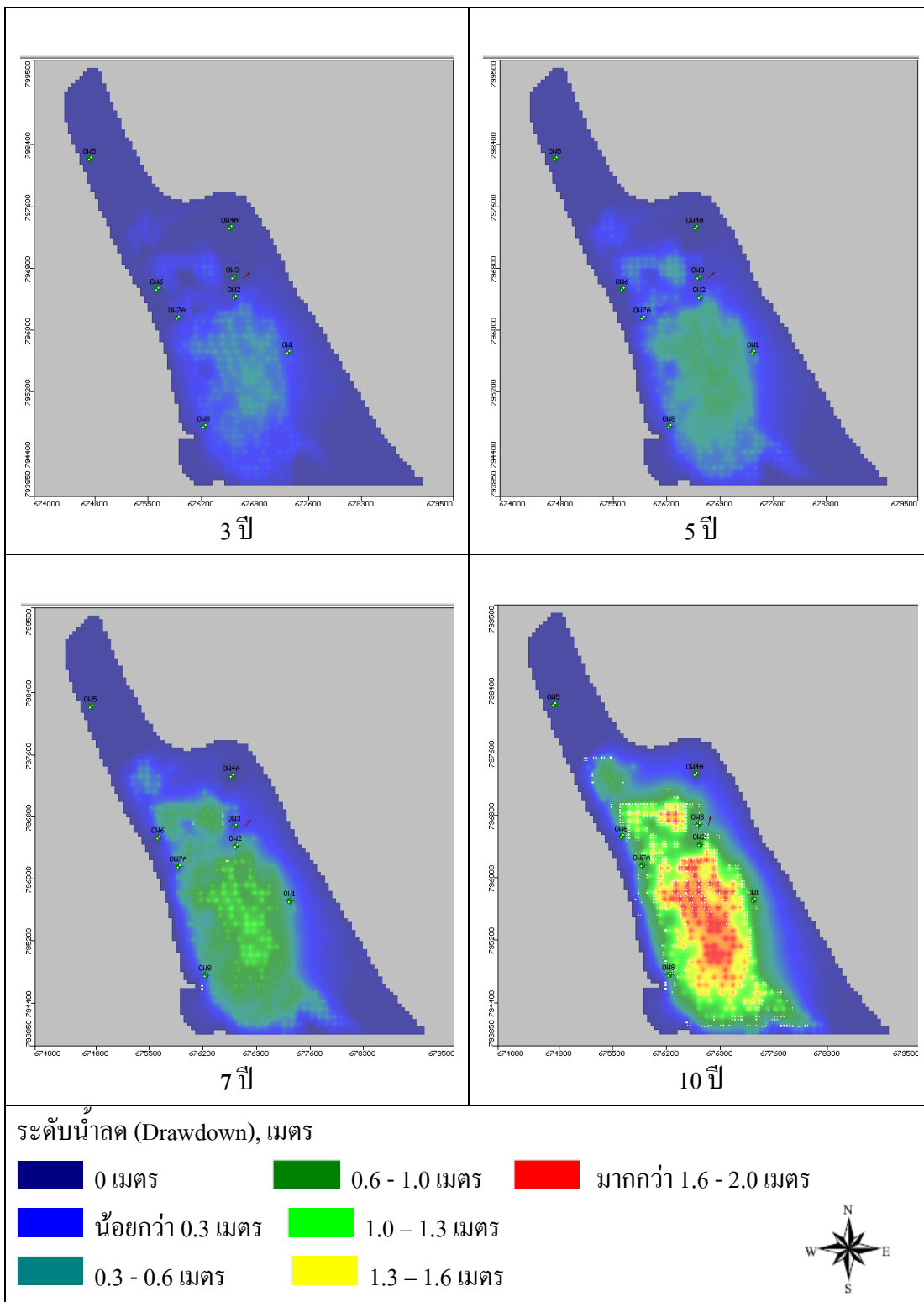
การจำลองการไหลของน้ำบาดาลในกรณีที่ปริมาณการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วง 10 ปีข้างหน้า ผลการจำลองพบว่า ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินโดยรวมไม่มีการเปลี่ยนแปลงของทิศทางการไหลของน้ำมาก กล่าวคือ ทิศทางการไหลไม่มีความแตกต่างจากในกรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5.20 เว้นแต่การลดลงของระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำเท่านั้นที่มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 5.21 โดยพบว่าที่เวลา 3, 5, 7 และ 10 ปี เกิดระยะน้ำลดสูงสุดประมาณ 0.68, 0.96, 1.38 และ 2.68 เมตร ตามลำดับ บริเวณใจกลางเมืองเทศบาลนครสงขลา ส่วนบริเวณอื่น เช่น แหลมสนอ่อน หาดสมิหลา และหาดชลาทัศน์ พบว่ามีระยะน้ำลดสูงสุดไม่เกิน 0.5 เมตร

ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีที่มีการสูบน้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วง 10 ปี ข้างหน้าทั้งในกรณี Constant density และกรณี Variable density ได้แสดงการแพร่กระจายของน้ำเค็ม ดังในรูปที่ 5.22 พบว่า เกิดการแพร่กระจายของของคลอไรด์เข้าสู่พื้นที่ศึกษามากขึ้นจากกรณีที่ 1 ทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้น ประมาณ 120 - 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลอ่าวไทยและริมทะเลสาบสงขลา ของชั้นน้ำบ่อทรายและชั้นน้ำสงขลา ได้แก่ บริเวณอนุสาวรีย์กรมหลวงชุมพร แหลมสนอ่อน หาดสมิหลา สนามกอล์ฟฟองใหญ่ ด้านตรวจคนเข้าเมือง และ ท่าเทียบเรือ ซึ่งพบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ที่มีปริมาณมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร มีทิศทางจากทิศทะเลทั้งสองข้างเข้าสู่บริเวณตัวเมืองเทศบาลนครสงขลาเป็นระยะทางประมาณ 75 เมตร จากแนวเดิม (รูปที่ 5.11) แต่เนื่องจากข้อมูลในภาคสนามของชั้นน้ำสงขลา มีน้อย ผลการจำลองของชั้นน้ำชั้นนี้จึงมีความน่าเชื่อถือต่ำ

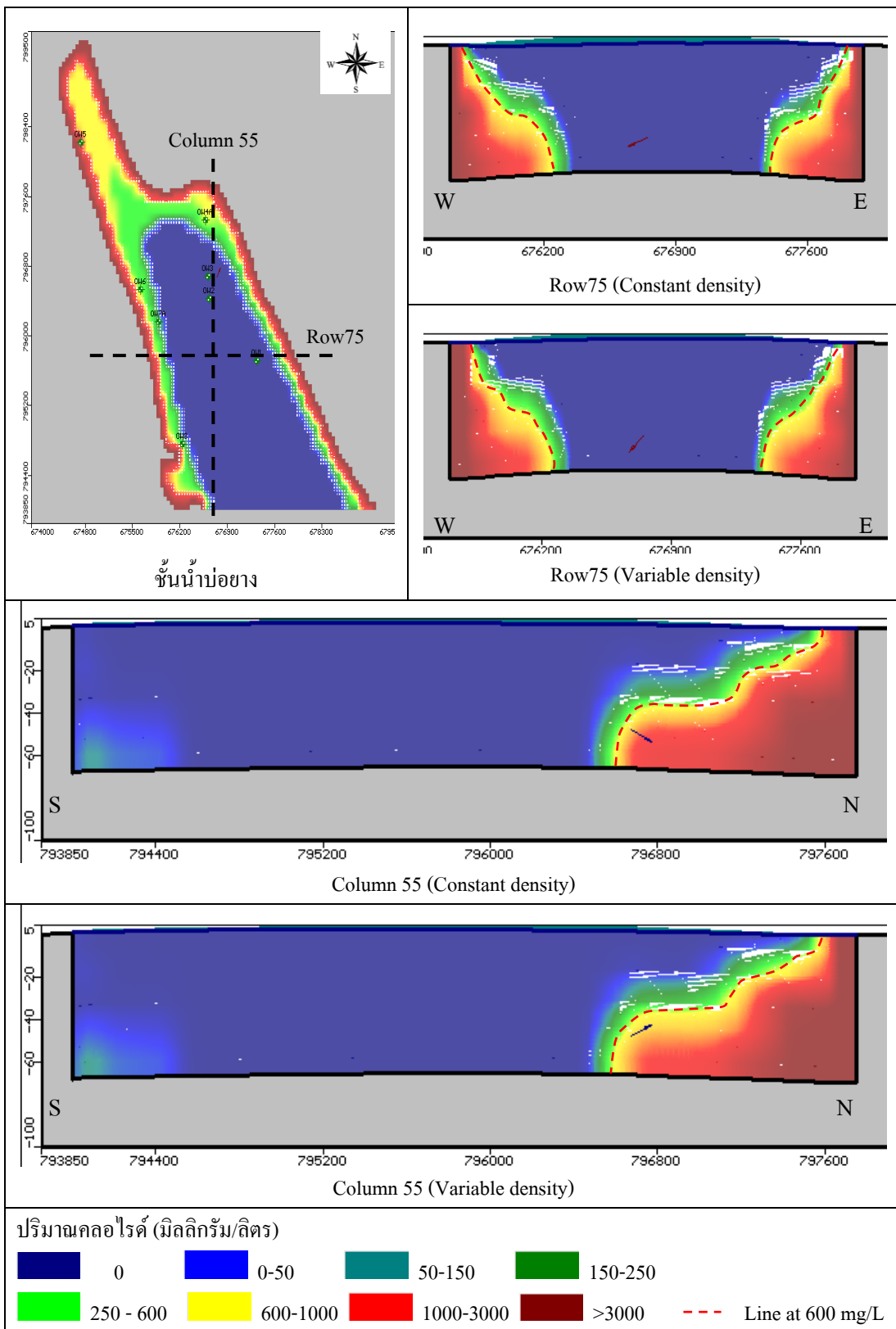
สมมูลน้ำบาดาลในกรณีที่ 3 ดังแสดงในตารางที่ 5.11 พบว่ามีปริมาณน้ำไหลเข้าแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยมาจาก Recharge, Storage, Specified flux, และ Constant head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลเข้ารวมประมาณ 2,278,777 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยออกจาก Well, Storage, Constant head, และ Specified flux ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลออกรวมประมาณ 2,287,295 ลูกบาศก์เมตรต่อปี จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใช้น้ำมากขึ้น 10 % (869,085 ลบ.ม./ปี) จะทำให้ปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่ทะเลน้อยลง (Constant head) และมีน้ำไหลเข้าจาก Storage มาขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการลดลงของระดับน้ำในแบบจำลองมากกว่ากรณีที่ 2



รูปที่ 5.20 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)



รูปที่ 5.21 ระดับน้ำลด (Drawdown) กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)



รูปที่ 5.22 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562)

ตารางที่ 5.11 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ณ ช่วงเวลา 10 ปี

แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ลบ.ม./ปี)	ปริมาณการไหลออก (ลบ.ม./ปี)
Storage	1,073,838	785,603
Constant Head	11,903	622,360
Wells	0	869,085
Flux	43,576	10,247
Recharge	1,149,440	0
Total	2,278,777	2,287,295

โดยสรุปผลการจำลองพบว่าปริมาณการสูบน้ำที่เพิ่มขึ้น 10 % ต่อปีในช่วง 10 ปี จะทำให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำบาดาลได้ กล่าวคือ จะเกิดระยะน้ำลดที่มากเกินไปกำหนดและเกิดการรุกคืบของน้ำเค็มจากทะเลสู่ชั้นน้ำบาดาลได้

5.11 เขตน้ำบาดาลย่อย (Zone Budget)

ในการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้จัดแบ่งพื้นที่ตามเขตน้ำบาดาลย่อยเพื่อแสดงถึงปริมาณน้ำบาดาลที่ไหลเข้าและไหลออกจากชั้นน้ำนั้นๆ ได้ชัดเจนขึ้น โดยแบ่งตามชั้นหินอุ้มน้ำและชั้นกั้นน้ำโดยพิจารณาในช่วงเวลาการคำนวณในปีที่ 10 (เดือนที่ 120 หรือในช่วงวันที่ 3650 ของการคำนวณ) ซึ่งเป็นช่วงเวลาสุดท้ายของการจำลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.12

5.11.1 ชั้นน้ำสมิหลา

ซึ่งจากสมดุลในน้ำจากตารางที่ 5.12 นี้เองสามารถพิจารณาชั้นน้ำสมิหลาซึ่งเป็นชั้นน้ำไร้แรงดันที่มีการใช้น้ำบาดาลมากที่สุดพบว่า มีปริมาณน้ำไหลเข้าประมาณ 14,204 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งได้จาก Recharge 14,204 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (100%) ส่วนปริมาณน้ำไหลออกรวมเท่ากับ 14,203 ลูกบาศก์เมตรต่อวันซึ่งไหลออกไปสู่ Storage 8,890 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (62.6%) Constant head 2,436 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (17.2%) Well 795 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (5.6%) Specified flux 76 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (0.5%) และ ไหลออกสู่ชั้นกั้นน้ำ 2008 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (14.1%)

5.11.2 ชั้นน้ำบ่อยาง

ชั้นน้ำบ่อยางซึ่งเป็นชั้นน้ำมีแรงดันมีการใช้น้ำมากรองจากชั้นน้ำสมิหลาโดยมีปริมาณน้ำไหลเข้ารวมประมาณ 1,444 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และปริมาณน้ำไหลออกเท่ากับคือ 1,444 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งได้จาก Constant head 3 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (0.2%) Specified Flux 13 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (0.9%) จากชั้นก้นน้ำ_1 1,427 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (98.8%) จากชั้นก้นน้ำ_2 1 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (0.1%) ส่วนปริมาณน้ำไหล ออกรวมเท่ากับน้ำที่ไหลเข้าเท่ากับ 1,444 ลูกบาศก์เมตรต่อวันซึ่งไหลออกไปสู่ Storage 112 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (7.8%) Constant head 550 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (38.1%) Well 123 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (8.5%) Specified flux 3 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (0.2%) และ ไหลออกสู่ชั้นก้นน้ำ_2 656 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (45.4%)

5.11.3 ชั้นน้ำสงขลา

ชั้นน้ำสงขลาซึ่งเป็นชั้นน้ำมีแรงดันที่ไม่มีมีการใช้น้ำเลยโดยมีปริมาณน้ำไหลเข้ารวมประมาณ 515 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และปริมาณน้ำไหลออกใกล้เคียงกันคือ 507 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งได้จาก Specified Flux 84 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (16.3%) จากชั้นก้นน้ำ_2 431 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (83.7%) ส่วนปริมาณน้ำไหลออกรวมเท่ากับ 507 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งไหลออกไปสู่ Storage 14 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (2.8%) Constant head 490 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (96.6%) และไหลออกสู่ชั้นก้นน้ำ_2 2 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (0.4%)

ตารางที่ 5.12 สมดุลน้ำบาดลแบ่งย่อยตามประเภทชั้นหินอุ้มน้ำ (Zone budget) ในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบัน

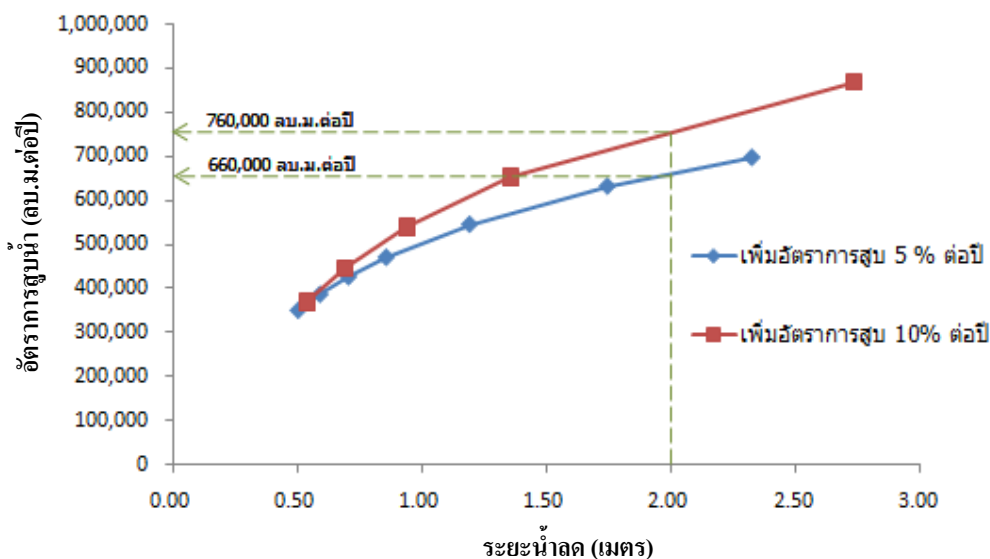
ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifers)	Storage		Constant head		Well		Specified flux		Recharge		From previous layer		To next layer		total	
	in (ม ³)	out (ม ³)	in (ม ³)	out (ม ³)	in (ม ³)	ou (ม ³)	in (ม ³)	out (ม ³)	in (ม ³)	out (ม ³)	in (ม ³)	out (ม ³)	in (ม ³)	out (ม ³)	in (ม ³)	out (ม ³)
ชั้นน้ำตมึหลา (Unconfined Aquifers)	0	8,890	0	2,436	0	795	0	76	14,204	0	-	-	0	2,008	14,204	14,203
ชั้นกั้นน้ำ_1 (Aquitard)	0	537	0	1	0	0	0	16	0	0	2,008	0	0	1,427	2,008	2,007
ชั้นน้ำป๋อยาง (Confined Aquifers)	0	112	3	550	0	123	13	3	0	0	1,427	0	1	656	1,444	1,444
ชั้นกั้นน้ำ_2 (Aquitard)	0	229	0	1	0	0	3	0	0	0	656	1	2	431	661	661
ชั้นน้ำสงขลา (Confined Aquifers)	0	14	0	490	0	0	84	0	0	0	431	2	-	-	515	507
Total in - Total out (ลบ.ม.)	0	9,780	3	3,478	0	918	100	95	14,204	0	4,521	4	4	4,521	18,832	18,822

5.12 ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย (Safe yield)

การประเมินปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยของชั้นน้ำสมิหลาโดยการใช้แบบจำลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับค่าระยะน้ำลด (Drawdown) ในช่วงเวลา 10 ปี ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.13 และสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังแสดงในรูปที่ 5.23

ตารางที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับระยะน้ำลดสูงสุด

ปีที่ (พ.ศ.)	เพิ่มอัตราการสูบน้ำ 5% ต่อปี		เพิ่มอัตราการสูบน้ำ 10% ต่อปี	
	อัตราการสูบน้ำ (ลบ.ม./ปี)	ระยะน้ำลด (เมตร)	อัตราการสูบน้ำ (ลบ.ม./ปี)	ระยะน้ำลด (เมตร)
1 (2553)	351824	0.51	368577	0.54
2 (2554)	369415	0.55	405435	0.61
3 (2555)	387886	0.59	445978	0.69
4 (2556)	407280	0.65	490576	0.80
5 (2557)	427644	0.71	539634	0.94
6 (2558)	449026	0.78	593597	1.12
7 (2559)	471478	0.86	652957	1.36
8 (2560)	495052	0.95	718252	1.68
9 (2561)	519804	1.06	790078	2.12
10 (2562)	545794	1.19	869085	2.73
11 (2563)	573084	1.34	-	-
12 (2564)	601738	1.53	-	-
13 (2565)	631825	1.74	-	-
14 (2566)	663417	2.01	-	-
15 (2567)	696587	2.32	-	-



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับระยะน้ำลดสูงสุดในชั้นน้ำสมิหลา

จากรูปที่ 5.19 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับระยะน้ำลดของชั้นน้ำ สมิหลา ในกรณีที่มีการเพิ่มอัตราสูบน้ำปีละ 5% และ 10% ในช่วงเวลา 10 ปี สามารถกำหนดปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย (Safe yield) ได้ดังนี้ (เกณฑ์กำหนดในหัวข้อ 5.10)

1) กรณีที่การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วงเวลา 10 ปี พบว่า ถ้าเพิ่มการใช้น้ำของพื้นที่ศึกษาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นปีละ 5% ในระยะเวลา 10 ปี หรือที่ปริมาณการสูบสูงสุดในปีที่ 10 มีปริมาณเท่ากับ 545,794 ลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือประมาณ 1,495 ลูกบาศก์เมตรต่อวันนั้น จะไม่ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับน้ำในชั้นเกิน 2 เมตร แต่เมื่อได้ทำการจำลองเป็นเวลา 15 ปี พบว่า ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยที่จะไม่ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับน้ำเกิน 2 เมตร เท่ากับ 660,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือประมาณ 1,800 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน นั่นคือหากมีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% พบว่าระดับน้ำลดมากกว่า 2 เมตร ภายในเวลา 14 ปี

2) กรณีที่การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ในช่วงเวลา 10 ปี พบว่า ถ้าเพิ่มการใช้น้ำของพื้นที่ศึกษาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นปีละ 10% ในระยะเวลา 10 ปี หรือที่ปริมาณการสูบสูงสุดในปีที่ 10 มีปริมาณเท่ากับ 869,085 ลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือประมาณ 2,380 ลูกบาศก์เมตรต่อวันนั้น ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยที่จะไม่ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับน้ำเกิน 2 เมตร เท่ากับ 750,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือประมาณ 2,054 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน นั่นคือหากมีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% พบว่าระดับน้ำลดมากกว่า 2 เมตร ภายในเวลา 9 ปี

ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ ได้ประเมินปริมาณการใช้น้ำ ปลอดภัยของเทศบาลนครสงขลาไว้ที่ 660,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยกำหนดระดับน้ำคสูงสุดไม่เกิน 2 เมตร ดังนั้นจึงสามารถใช้ระบบบริหารจัดการการสูบน้ำเพื่อให้ได้ Safe yield ของเทศบาลนครสงขลาเพิ่มขึ้น โดยอาจจำกัดอัตราการสูบในบริเวณกึ่งกลางไว้แต่สามารถเพิ่มอัตราสูบบริเวณรอบนอกของเขตเทศบาลนครสงขลาได้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

การศึกษาการไหลของน้ำบาดาลและการรุกรานของน้ำเค็มในเทศบาลนครสงขลา ประกอบด้วย การศึกษาสภาพธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา การติดตามตรวจวัดระดับน้ำและคุณภาพน้ำบาดาล ศึกษาการไหลและสมดุลของแหล่งน้ำบาดาล และประเมินศักยภาพของน้ำบาดาลเพื่อคาดการณ์การรุกรานของน้ำเค็มในอนาคตโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW (version 4.1) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1.1 สภาพอุทกธรณีวิทยาของเทศบาลนครสงขลา

เทศบาลนครสงขลาอยู่ในเขตพื้นที่ตำบลบ่อยางทั้งหมด วางตัวอยู่ในแนว ตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ ทางด้านเหนือ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก มีทะเล ล้อมรอบนั่นคือ ทะเลอ่าวไทยและทะเลสาบสงขลา รวมพื้นที่ศึกษา 9.27 ตารางกิโลเมตร แหล่งน้ำ บาดาลหลักในพื้นที่คือ แหล่งน้ำบาดาลในตะกอนหินร่วน แบ่งเป็น 3 ชั้นน้ำคือ ชั้นน้ำสมิหลา ชั้น น้ำบ่อยาง และชั้นน้ำสงขลา ตามลำดับ ซึ่งเป็นแหล่งน้ำบาดาลในตะกอนดินร่วน (Unconsolidated Aquifer) โดยน้ำบาดาลจะถูกกักเก็บอยู่ภายในช่องว่างของชั้นตะกอนที่ยังไม่จับตัวและเชื่อม ประสาน ซึ่งเป็นชั้นหินให้น้ำตะกอนพัดพา (Floodplains Deposits Aquifer; Qfd) เป็นชั้นหินให้น้ำ ประกอบด้วย ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว โดยน้ำบาดาลจะถูกกักเก็บอยู่ในช่องว่างระหว่าง เม็ดทราย ทราย ที่สะสมอยู่ที่ราบลุ่มน้ำหลากบริเวณแนวคอคอดโค้งของทางน้ำและบริเวณที่ราบ ชายฝั่งทะเลที่เกิดจากการพัดพาของทางน้ำ

ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีของพื้นที่ศึกษาเท่ากับ 1,994 มิลลิเมตร มีการเติมน้ำลงสู่ ชั้นน้ำบาดาลประมาณ 45 % ของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย พื้นที่รับน้ำหลักจะอยู่ด้านบนของแบบจำลอง นั่นคือชั้นน้ำสมิหลา ซึ่งเป็นชั้นน้ำไร้แรงดัน (Unconfined aquifer) ส่วนพื้นที่สูญเสียน้ำคือบริเวณ ทิศตะวันออกและตะวันตกของพื้นที่โดยน้ำจะไหลจากบริเวณตอนกลางของพื้นที่ลงสู่ทะเลทั้งสอง ด้าน

6.1.2 การไหลและสมดุลของน้ำบาดาล

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองการไหลของน้ำบาดาลในระบบ 3 มิติ ทำการจำลองกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเปรียบเทียบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง การปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเพิ่มเติมน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำ โดยใช้ระดับแรงดันน้ำจากบ่อสังเกตการณ์จำนวน 8 บ่อซึ่งกระจายอยู่ในพื้นที่ เป็นระดับอ้างอิงในการปรับเทียบค่าที่ได้จากการจำลอง

ผลการจำลองการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าการไหลของน้ำบาดาลในแบบจำลองมีลักษณะการไหลที่สอดคล้องกับแบบจำลองเชิงมโนทัศน์กล่าวคือ พบว่าทิศทางการไหลของน้ำบาดาลโดยทั่วไปจะไหลจากพื้นที่เติมน้ำทางทิศใต้ (ภูเขาเขารูปช้าง) มารวมกับน้ำจากพื้นที่รับน้ำ (Recharge) บริเวณกลางพื้นที่ศึกษาแล้วไหลออกทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกลงสู่ทะเลอ่าวไทยและทะเลสาบสงขลาตามลำดับ โดยมีค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 4.948 ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.15 เมตร และจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองพบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในแบบจำลองมากที่สุดคือค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ผลการศึกษาสมดุลน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2552 โดยการใช้แบบจำลองพบว่า ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่แบบจำลองมาจาก การเติมน้ำสุทธิจากน้ำฝน 1,149,460 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ปริมาณน้ำที่กักเก็บอยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำ 841,795 ลูกบาศก์เมตรต่อปี การเติมน้ำจากบริเวณทิศใต้ของพื้นที่ 44,270 ลูกบาศก์เมตรต่อปี จากทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย 1,534 ลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณน้ำไหลเข้าระบบทั้งหมด 2,037,070 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนปริมาณน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลอง ไหลออกไปกักเก็บในชั้นหินอุ้มน้ำ 850,279 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ไปออกสู่ทะเลสาบสงขลา และทะเลอ่าวไทย 842,696 ลูกบาศก์เมตรต่อปี จากบ่อบาดาลที่มีการสูบน้ำ 335,070 ลูกบาศก์เมตรต่อปี และไปยังบริเวณทิศใต้ของพื้นที่ 10,030 ลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณน้ำไหลออกจากแบบจำลองทั้งหมด 2,038,080 ลูกบาศก์เมตรต่อปี

6.1.3 การรुक้าของน้ำเค็ม

การศึกษาการรुक้าของน้ำเค็มในเทศบาลนครสงขลาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์เป็นตัวบ่งชี้ ผลการเปรียบเทียบค่าปริมาณคลอไรด์เมื่อไม่นำค่าปริมาณรอก้าของบ่อสังเกตการณ์ที่ 5 (OW5) ซึ่งมีค่าที่วัดได้ในสนาม แตกต่างกับค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมมากจนผิดปกติก็นำมาคำนวณ ในกรณีจำลองให้ความหนาแน่นของน้ำคงที่จะได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 16.85 และค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 144.75 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนกรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 17.76 และค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 152.55 มิลลิกรัมต่อ

ผลจากการจำลองทั้งจากกรณีให้ความหนาแน่นของน้ำคงที่และกรณีให้ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบัน พบว่า ชั้นน้ำสมิหลามีปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี ส่วนบริเวณที่มีการกระจายตัวของคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐานจะจำกัดขอบเขตอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาและริมทะเลอ่าวไทยของชั้นน้ำบ่ออย่าง ได้แก่ บริเวณอนุสาวรีย์กรมหลวงชุมพร แหลมสนอ่อน หาดสมิหลา สนามกอล์ฟทองใหญ่จรดหาดเก้าเส้ง ด้านตรวจคนเข้าเมือง และทำเทียบเรือจรดไปถึงสถานีขนส่ง มีขอบเขตความเค็มคิดเป็นระยะทางจากริมทะเลสาบสงขลาเข้าสู่ตัวเมืองประมาณ 300 เมตร และจากริมทะเลอ่าวไทยเข้าสู่ตัวเมืองประมาณ 250 เมตร โดยแนวของคลอไรด์ที่มีปริมาณมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวเมืองเทศบาลนครสงขลา คิดเป็นระยะทาง 75 เมตร จากแนวเดิม ในส่วนของชั้นน้ำสงขลาจะไม่ขอนำเสนอผลการศึกษาเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากภาคสนามมีน้อยและมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลต่ำซึ่งอาจทำให้ผลการจำลองของชั้นน้ำชั้นนี้มีความผิดพลาดได้มาก

6.1.4 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล

การประเมินปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำบาดาล (Safe yield) โดยการกำหนดรูปแบบการใช้น้ำในอัตราที่แตกต่างกัน โดยกำหนดเงื่อนไขที่ยอมรับได้ในการจำลองคือ ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำสมิหลาต้องลดลงไม่เกิน 2 เมตร และการรुक้าของคลอไรด์ที่มีปริมาณมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องไม่มากกว่า 100 เมตร จากตำแหน่งปัจจุบัน

ผลการศึกษาพบว่าสภาพการใช้น้ำปัจจุบันเท่ากับ 335,070 ลูกบาศก์เมตรต่อปี หากมีอัตราการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วง 10 ปีข้างหน้า (พ.ศ.2562) พบว่าจะส่งผลให้ระดับน้ำลดลงสูงสุด 1.19 เมตร และหากเพิ่มอัตราการใช้น้ำปีละ 10% จะส่งผลให้ระดับน้ำลดลงสูงสุด 2.68 เมตร นั่นคือหากมีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราสูงขึ้นจะส่งผลให้ระดับน้ำลดลงมากกว่า 2 เมตร ภายใน 14 ปี และ 9 ปี ตามลำดับ ส่วนการรुक้าของน้ำเค็มในกรณีมีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้ตัวเมืองเทศบาลนครสงขลามากยิ่งขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือแนวของคลองไรด์ที่มีปริมาณมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ยังไม่มีการเคลื่อนที่จากแนวปัจจุบัน ส่วนในกรณีมีการใช้น้ำเพิ่มขึ้น 10% ต่อปี พบว่า สำหรับชั้นน้ำบ่อของแนวของคลองไรด์ที่มีปริมาณมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวเมืองเทศบาลนครสงขลาเป็นระยะทางประมาณ 75 เมตร ดังนั้นจึงให้เกณฑ์การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเป็นเกณฑ์หลักมากกว่าเกณฑ์การรुक้าของน้ำเค็มในการประเมินศักยภาพน้ำบาดาล ดังนั้นจึงประเมินได้ว่าปริมาณใช้น้ำปลอดภัยของเทศบาลนครสงขลาเท่ากับ 660,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือประมาณ 1,810 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากพื้นที่ศึกษามีลักษณะทางด้านอุทกธรณีวิทยาและชั้นน้ำบาดาลที่มีความซับซ้อน และเป็นพื้นที่ที่ไม่ได้มีการศึกษาวิจัยมาก่อน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายมีจำกัด การรวบรวมข้อมูลในพื้นที่ศึกษาจึงอาจไม่เพียงพอหรือตรงกับความเป็นจริงมากนัก ดังนั้นความน่าเชื่อถือของแบบจำลองนี้จึงมีเพียงระดับหนึ่งตามข้อจำกัดของข้อมูล การเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสามารถทำได้โดยการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมทั้งในด้านปริมาณและความละเอียดดังข้อเสนอแนะต่อไปนี้

1) เนื่องจากของมูลชั้นดินในพื้นที่ศึกษายังมีน้อยเกินไปจึงควรมีการเจาะสำรวจชั้นดินให้ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่และควรมีการสำรวจด้านธรณีฟิสิกส์ (Seismic test) เพิ่มเพื่อศึกษาความต่อเนื่องของชั้นน้ำในพื้นที่ศึกษาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นน้ำสงขลาของวิทยานิพนธ์

2) การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีผลต่อแบบจำลองมากที่สุด ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาข้อมูลทางชลศาสตร์เพิ่มเติมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านทั้งในแนวราบและแนวตั้งของชั้นหินอุ้มน้ำแต่ละชนิดในพื้นที่ศึกษาเพื่อนำมาปรับปรุงแบบจำลองให้มีความถูกต้องมากขึ้น

3) การกำหนดสภาพขอบเขตแบบจำลองมีผลต่อความถูกต้องและแม่นยำในการจำลองมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งควรมีการเก็บข้อมูลเพิ่มบริเวณขอบเขตด้านทิศใต้ของพื้นที่ศึกษา ซึ่งได้กำหนดเป็นขอบเขตน้ไหลผ่าน (Specified flux) และบริเวณที่มีขอบเขตติดกับทะเลควรพิจารณาให้มีผลของน้ำขึ้นน้ำลงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเพื่อจะได้นำมาปรับปรุงแบบจำลองให้มีความถูกต้องและเป็นไปตามสภาพความเป็นจริงมากที่สุด

4) การขาดข้อมูลการใช้น้ำบาดาลที่แท้จริง ทำให้การประเมินปริมาณการใช้น้ำทั้งหมดของพื้นที่ศึกษาอาจยังไม่ถูกต้อง ซึ่งคาดว่าจะยังมีการใช้น้ำบาดาลอีกปริมาณมากที่ไม่ได้มีการบันทึกข้อมูลไว้ ดังนั้นจึงควรส่งเสริมให้องค์กรส่วนท้องถิ่น เช่น องค์กรบริหารส่วนตำบล บันทึกอัตราการสูบน้ำของบ่อบาดาลทั้งหมดในตำบล รวมทั้งค่าการสูบน้ำที่แท้จริงในภาคเอกชน เพื่อนำมาประเมินอัตราการใช้น้ำที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

5) ควรมีการเจาะบ่อบาดาลเพิ่มจำนวนบ่อสังเกตการณ์ให้ครบทุกชั้นน้ำและให้กระจายครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ศึกษาเพื่อเพิ่มความละเอียดของข้อมูลมากขึ้น

บรรณานุกรม

- เกรียงศักดิ์ ศรีสุข (2543). *น้ำใต้ดิน-แบบจำลอง-การปนเปื้อน*. ขอนแก่น : ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ข้อมูลทรัพยากรธรรมชาติและจัดการสิ่งแวดล้อมลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา, ฝ่าย. (2544). *แผนที่ดิจิทัลขอบเขตการปกครองจังหวัดสงขลา*. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จังหวัดสงขลา, สำนักงาน. (2545). *ข้อมูลจังหวัดสงขลา ปี พ.ศ. 2544*. สงขลา.
- ทรัพยากรน้ำบาดาล, กรม. (2546). *โครงการศึกษาศักยภาพน้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา*. กรุงเทพฯ: กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ทรัพยากรน้ำบาดาล, กรม. (2549). *รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจัดทำแนวทางการพัฒนาและอนุรักษ์น้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา*. กรุงเทพฯ.
- ทรัพยากรธรณี, กรม. (2549). *ข้อมูลรายงานชั้นดินหินจากหลุมเจาะน้ำบาดาล*. กรุงเทพฯ.
- ทรัพยากรธรณี, กรม. (2544). *แผนที่ดิจิทัลชั้นหินอุ้มน้ำจังหวัดสงขลา*. กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ.
- ทรัพยากรธรณี, กรม. (2544). *แผนที่ดิจิทัลธรณีวิทยาจังหวัดสงขลา*. กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ.
- ทรัพยากรธรณี, กรม. (2544). *แผนที่ดิจิทัลเส้นชั้นความสูงจังหวัดสงขลา*. กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ.
- พัฒนาที่ดิน, กรม. (2543). *แผนที่ดิจิทัลเรื่อง การใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2543*. กรุงเทพฯ.
- วินัย ศรีอำพร (2540). *วิศวกรรมน้ำใต้ดิน*. ขอนแก่น : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุจิริต คุณชนกุลวงศ์ และ โชคชัย สุทธิธรรมจิต (2551). *การเปรียบเทียบเทคนิคการประเมินศักยภาพน้ำบาดาล*. *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา*. ปีที่ 19. ฉบับที่ 3-2551.
- สุรพล อารีย์กุล. (2534). *ศักยภาพน้ำบาดาลในแอ่งหาคใหญ่*. สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และโลหวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล, สำนักงาน. (2546). *รายงานฉบับสมบูรณ์ ศึกษาความสมดุลของแหล่งน้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ แอ่งหาคใหญ่ จังหวัดสงขลา*. กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. กรุงเทพฯ.

- อมรรัตน์ วัฒนธรรม (2548). การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของน้ำบาดาลแอ่งหาคใหญ่
จังหวัดสงขลา. สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อรุณ ลูกจันทร์ (2552). การศึกษาการรุกของน้ำเค็มในชั้นน้ำใต้ดินในแอ่งหาคใหญ่โดยใช้
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์. สาขาวิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค) คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- อุตุนิยมวิทยา, กรม. (2546). ข้อมูลลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา.
กรุงเทพฯ.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for
Computing Crop Requirements. *Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome*
- Anderson, M.P. and Woessner, W.W. (1992). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of
Flow and Advective Transport*. California : Academic Press, Inc.
- C. Paniconi, et.al., (2000). A Modeling Study of Seawater Intrusion in the Kobra Coastal Plain,
Tunisia. *Phys. Chem. Earth (B)*, Vol.26, No.4, p.345-351.
- Cheng, A. H.-D. and Ouazar, D. (2003). *Coastal Aquifer Management monitoring, modeling, and
case studies*. USA : Lewis Publishers.
- Domenico, P.A., (1972). *Concepts and Model in Groundwater Hydrology*. New York : Mc-Graw-
Hill, p. 405
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2 nd ed.
New York : John Wiley and Sons, Inc.
- Fetter, C.W., (1994). *Applied Hydrogeology*. 3 rd ed. New Jersey : Prentice Hall, Inc.
- Foster Stephen, et.al., (2000). Groundwater in Rural Development. World Bank, Technical Report
No. 463.
- Guo, Weixing, and Bennett, G.D. (1998). Simulation of saline/fresh water flows using
MODFLOW, in Poeter, E., and others, *MODFLOW 98 Conference*, Golden, Colorado,
Proceedings: Golden, Colorado, v .1, p. 267-274.
- Guo, Weixing, Langevin, C.D., and Bennett, G.D. (2001). Improvements to SEAWAT and
application of the variable-density modeling program in southern Florida, in Poeter, E.,
and others, *MODFLOW 2001 and other modeling Odysseys Conference*, Colorado
School of Mines, Golden, Colorado, v .2, p. 261-267.

- Guo, Weixing and Langevin, C.D., (2002). *User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density groundwater flow*. US Geol. Surv. Tech. Water Resour. Invest., Book 6: chapter 7, 77 pp.
- Lee, A.G. (2003). 3-D Numerical Modeling of Freshwater Lens on Atoll Island, Corporate Strategic Research, ExxonMobil Research and Engineering Company.
- M.A. Sophocleos. (1997). Why "Safe yield" is not Sustainable, *Managing Water Resources Systems, Groundwater*, Vol.35, No.4, p.561.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., (1988). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model*. USA : US Geol. Surv. Tech. Water resource. Invest., Book6.
- Morris D.A., and Johnson A.I., (1967). *Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil material as analyzed by Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey 1948-1960.*, USGS, Water Supply Paper 1839-D.
- Moss R., and Moss G.E., (1990). *Handhook of Groundwater Development*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Narayan, K.A. et.al., (2007). Modeling seawater intrusion in the Burdekin Delta Irrigation Area, North Queensland, Australia, *CSIRO Land and Water*, Davies Laboratory, Townsvill, Australia.
- P.E. Misut., W. Yulinsky., D. Cohen., D. St. Germain., C. I. Voss., J. Monti., (2005), A SUTRA Model of Seawater Intrusion in Western Long Island, New York, at <http://hdl.handle.net/1951/47835>
- Spitz, K. and Moreno, F. (1996). *A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling*. New York : John Wiley and Sons, Inc.
- Toth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow small drainage basin, *Geophysic Research*. 68, 4795-4812.
- Varut Guvanasen, et.al., (2003). Development of a large-scale Three-dimensional Density-Dependent Saltwater Intrusion Model for an East-central Florida Region, St.Johns River Water Management District, Palatka, FL.
- Wang H.F., and Anderson M.P. (1982). *Introduction to Groundwater Modeling Finite Difference and Finite Element Method*. Francisco: W.H Freeman and Company.

Zheng, Chunmiao, and Wang, P.P., (1999). MT3DMS: A modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and user's guide: Contract report SERDP-99-1: Vicksburg, Miss., U.S. Army Engineer Research and Development Center, 169 p.

เอกสารอ้างอิงอิเล็กทรอนิกส์

เข้าถึงได้จาก : <http://igrac.nitg.tno.nl/tsunami2-i.html>

เข้าถึงได้จาก : <http://water.usgs.gov/ogw/gwrp/saltwater/salt.html>

เข้าถึงได้จาก : [http://www.douglas.co.us/water/What_is_an_Aquifer\\$.html](http://www.douglas.co.us/water/What_is_an_Aquifer$.html)

เข้าถึงได้จาก : <http://www.omafra.gov.on.ca>

เข้าถึงได้จาก : <http://www.solinst.com/Res/papers/101C4Salt.html>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บ่อที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ ก-1 รายละเอียดบ่อที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	หมายเลขบ่อ	พิกัดบ่อ		สถานี	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	ความลึก เจาะ (ม.)	ความลึก พัฒนา (ม.)	ระยะท่อกรอง (ม.)
		ออก-ตก	เหนือ-ใต้							
1	H0043	676250	795550	โรงพยาบาลสงขลา	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	28.5	28.5	16.50-25.50
2	H0044	678656	793381	บ้านเก่าสัง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	27	27	15.00-22.50
3	H0045	662121	779251	เทศบาล	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	69	69	42.00-48.00,48.00-57.00,
4	H0049	676550	796850	โรงเรียนมหามหาวิชราวุธ	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	16.5	15	6.00-12.00
5	H0186	676532	796425	โรงเรียนวรนาธิเรณิม	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	18	18	6.00-12.00
6	H0230	677650	794150	ค่ายรามคำแหง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	12	6	3.00-6.00
7	H0237	668259	778257	ค่ายรามคำแหง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	67.5	42	12.00-42.00
8	H0583	675001	797612	บ้านแม่ปรี้อ	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	99	99	78.00-84.00
9	H1383	678753	793508	ร.พ.ประสาทสงขลา	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	27	27	6.00-12.00
10	H1502	676630	796681	บ้านในเมือง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	21	21	12.00-16.00
11	H1503	675659	796545	บ้านในเมือง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	33	33	25.00-28.00,25.00-28.00
12	H1504	677148	794672	บ้านเก่าสัง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	4.5	4.5	32.00-40.00
13	H1505	675597	796500	บ้านในเมือง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	60	60	48.00-52.00

ตารางที่ ก-1 รายละเอียดดบอสังกตการณ์ที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

ลำดับที่	หมายเลขบ่อ	พิกัดบ่อ		สถานี	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	ความลึกเจาะ (ม.)	ความลึกพัฒนา (ม.)	ระยะท่อกรอง (ม.)
		ออก-ตก	เหนือ-ใต้							
14	H1506	675767	796152	บ้านในเมือง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	18	18	8.00-12.00
15	H1507	675494	797045	บ้านในเมือง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	21	21	12.00-16.00
16	TH0201	675953	796683	ทรัพยากรธรณี จ.สงขลา	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	27	27	18.00-26.00
17	TH0202	675994	796720	ทรัพยากรธรณี จ.สงขลา	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	27	27	19.00-27.00
18	TH0203	675014	797601	สถานีทหารเรือ(ฐานทัพเรือ)	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	54	54	44.00-50.00
19	TH0204	675002	797698	สถานีทหารเรือ(ฐานทัพเรือ)	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	45	45	41.00-45.00
20	TH0262	675010	797614	บ้านในเมือง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	36	36	12.00-20.00,26.00-32.00
21	TH0263	676451	797021	บ้านในเมือง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	36	36	28.00-32.00
22	TH0280	675201	797461	บ้านในเมือง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	23	23	8.00-22.50
23	TH0281	677515	794251	บ้านในเมือง	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	48	48	40.00-44.00
24	TH0318	676579	796306	โรงเรียนวรนาธิเรลิม	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	18	18	8.00-16.00
25	TH0409	676639	796430	หน้าศาลากลางจังหวัดสงขลา	บ่อยาง	เมืองสงขลา	สงขลา	30	30	18.00-22.00,26.00-28.00

ภาคผนวก ข
ข้อมูลน้ำฝน-การคายระเหย

ตารางที่ ข-1 รายละเอียดสถานีวัดน้ำฝน

รหัสสถานี	พิกัด		ชื่อสถานี	จังหวัด	ช่วงปีสถิติข้อมูล	ปริมาณฝนเฉลี่ย (มม.)		
	ออก-ตก	เหนือ-ใต้				ต่ำสุด	สูงสุด	รายปี
568501	676312	796406	อำเภอเมือง	สงขลา	2530 – 2550	1,042	3,190	1,997

ตารางที่ ข-2 รายละเอียดปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือน

รหัสสถานี	ชื่อสถานี		ปริมาณฝนเฉลี่ย (มม.)											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	
568501	70	56	61	70	125	91	84	116	129	257	510	340	1,997	

ตารางที่ ข-3 ปริมาณการคายระเหยเฉลี่ยรายเดือน

รหัสสถานี	ชื่อสถานี		ปริมาณฝนเฉลี่ย (มม.)											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	
568501	150.7	157.6	182.3	172	156.7	142	144.3	149.2	136.8	125	102.1	119.7	1738.40	

ตารางที่ ข-4 รายละเอียดงบประมาณรายเดือน

ปี/เดือน	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม
2530	70	53	61	70	57.4	121	0.9	82.6	149	173.4	207	683
2531	57.6	49.9	20.4	80.5	116.7	101.8	54.4	172.4	160.8	115	716.6	150.1
2532	3.2	13.2	0.1	104.4	205.8	141.3	174.2	78.5	129.9	191.5	509.7	429.8
2533	80	2.4	11.5	99	24.1	1.3	0	41.2	101.7	428.7	369.1	114.2
2534	18.7	5.1	41.9	72.2	299.1	37.4	138.7	191.4	138.5	219.5	342.9	301.9
2535	14.9	21.2	7.4	53.2	106	120.5	79.1	109.2	92	158.9	409.3	207.4
2536	30	0	90.9	57.3	133.3	54.4	34.9	86.3	224.5	270.7	765.7	607
2537	19.4	7.6	152.4	59.7	41.9	148.1	55.3	194.9	125.7	214.5	658.2	132.4
2538	72.8	10.1	114.6	7.1	127.8	73.7	175.8	122.2	174	186.2	826.5	410.6
2539	4.1	65.3	1.2	234.9	135.5	57.9	89.7	111	13.7	260	440.4	895.8
2540	7.1	50.8	7.7	70.3	233.3	57.9	89.7	352.7	48.6	322	433.1	643.8

ตารางที่ ๕-5 รายละเอียดปริมาณฝนรายเดือน (ต่อ)

ปี/เดือน	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม
2541	12.5	0.7	17.7	43.1	51.5	111.4	109.6	124.6	103.5	260.1	337.2	526.7
2542	290.2	467.1	69.2	82.4	139.3	78.5	88	212.6	118.8	265.9	500.1	657.2
2543	67.3	89.9	126.6	77.7	99.4	118.4	35.9	77.6	80.4	203.7	926.6	270
2544	224.7	35.9	157.7	59.5	47.4	67.2	162.8	39.7	81.7	277.7	459.5	505.2
2545	4.9	1.5	44.5	32.7	112.2	73.1	47	55.2	80.1	184.5	503.4	260
2546	86.2	63.6	123.4	18.7	78.7	79.2	54.4	69.2	156.5	579.7	488.6	449.5
2547	15.1	20.5	14.6	28	105.8	58.2	82.5	82.5	326.1	197.3	417.4	207.1
2548	13.3	27	38.2	3.8	144	90.6	93.5	159.3	182.2	350.2	872.2	1215.1
2549	69.5	119.3	106.7	126.7	153.1	197.7	41.7	36.5	91.4	171	303.8	190
2550	310	7.3	70.6	89.6	203	113.6	146.6	38	125.8	363.8	217.1	169.8

ภาคผนวก ค
ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลและระดับน้ำบาดาล

ตารางที่ ค-1 ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลครั้งที่ 1, (กันยายน 2551)

Well No	สถานี	ph	Cl (mg/L)	TDS (mg/L)	Conduct (us/cm)	Salinity (ppt.)	ชั้นน้ำ
OW1	ม. เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	7.53	25.5	358	524.3	0.2	บ่อยาง
OW2	ศาลากลาง	7.33	31.81	660	1057	0.4	บ่อยาง
OW3	เทศบาล	6.64	30.84	310	438	0.2	สมิหลา
OW4a	สนามกอล์ฟทองใหญ่	7.97	166.58	6309	8680	5.4	บ่อยาง
OW4b	สนามกอล์ฟทองใหญ่	8.03	27.2	396	560.8	0.2	บ่อยาง
OW4c	สนามกอล์ฟทองใหญ่	9.58	563.37	1313	1820	1.0	บ่อยาง
OW5	แหลมสนอ่อน	7.96	441.96	1132	1614	0.8	บ่อยาง
OW6	โรงเรียนวิเชียรชม	6.36	942.19	1992	2851	1.5	บ่อยาง
OW7a	พิพิธภัณฑ์ราชรงค์	7.39	21.85	253	350	0.1	สมิหลา
OW7b	พิพิธภัณฑ์ราชรงค์	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.	บ่อยาง
OW8	โรงเรียนเทศบาล 1	7.47	63.38	478	686.1	0.3	สมิหลา

ตารางที่ ค-2 ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลครั้งที่ 2, (ธันวาคม 2551)

Well No	สถานี	ph	Cl (mg/L)	TDS (mg/L)	Conduct (us/cm)	Salinity (ppt.)	ชั้นน้ำ
OW1	ม. เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	7.47	15.17	251	366.2	0.1	บ่อยาง
OW2	ศาลากลาง	7.37	20.06	182	266.2	0.1	บ่อยาง
OW3	เทศบาล	6.56	27.89	325	483.4	0.2	สมิหลา
OW4a	สนามกอล์ฟทองใหญ่	9.05	2930.37	5386	7531	4.3	บ่อยาง
OW4b	สนามกอล์ฟทองใหญ่	7.96	28.86	373	546.6	0.2	บ่อยาง
OW4c	สนามกอล์ฟทองใหญ่	9.56	518.56	1205	1768	0.9	บ่อยาง
OW5	แหลมสนอ่อน	7.83	401.15	1087	1579	0.7	บ่อยาง
OW6	โรงเรียนวิเชียรชม	6.4	869.82	Nd.	Nd.	Nd.	บ่อยาง
OW7a	พิพิธภัณฑ์ราชรงค์	7.1	10.76	43.4	63.82	0	สมิหลา
OW7b	พิพิธภัณฑ์ราชรงค์	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.	บ่อยาง
OW8	โรงเรียนเทศบาล 1	7.16	52.35	453	671.7	0.3	สมิหลา

ตารางที่ ก-3 ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลครั้งที่ 3, (มีนาคม 2552)

Well No	สถานี	ph	Cl (mg/L)	TDS (mg/L)	Conduct (us/cm)	Salinity (ppt.)	ชั้นน้ำ
OW1	ม. เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	7.13	22.99	199	292.2	0.1	บ่อยาง
OW2	ศาลากลาง	7.41	19.57	145	213.4	0.1	บ่อยาง
OW3	เทศบาล	6.47	16.14	212	313.4	0.1	สมิหลา
OW4a	สนามกอล์ฟทองใหญ่	10.13	2255.26	2867	4253	2.2	บ่อยาง
OW4b	สนามกอล์ฟทองใหญ่	7.89	30.82	330	484.7	0.2	บ่อยาง
OW4c	สนามกอล์ฟทองใหญ่	9.61	503.89	868	1278	0.6	บ่อยาง
OW5	แหลมสนอ่อน	7.71	498.99	852	1258	0.6	บ่อยาง
OW6	โรงเรียนวิเชียรชม	6.43	797.41	1123	1653	0.8	บ่อยาง
OW7a	พิพิธภัณฑ์ราชรังค์	6.81	12.72	188	274.3	0.1	สมิหลา
OW7b	พิพิธภัณฑ์ราชรังค์	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.	บ่อยาง
OW8	โรงเรียนเทศบาล 1	6.85	21.53	249	367.5	0.1	สมิหลา

ตารางที่ ก-4 ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลครั้งที่ 4, (มิถุนายน 2552)

Well No	สถานี	ph	Cl (mg/L)	TDS (mg/L)	Conduct (us/cm)	Salinity (ppt.)	ชั้นน้ำ
OW1	ม. เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	6.79	27.08	231	339.8	0.1	บ่อยาง
OW2	ศาลากลาง	7.45	18.05	126	185.2	0	บ่อยาง
OW3	เทศบาล	6.38	31.83	231	340.6	0.1	สมิหลา
OW4a	สนามกอล์ฟทองใหญ่	8.21	2116.26	3193	4721	2.5	บ่อยาง
OW4b	สนามกอล์ฟทองใหญ่	7.82	24.7	335	491.6	0.2	บ่อยาง
OW4c	สนามกอล์ฟทองใหญ่	9.66	454.13	961	1417	0.7	บ่อยาง
OW5	แหลมสนอ่อน	7.59	460.75	987	1451	0.7	บ่อยาง
OW6	โรงเรียนวิเชียรชม	6.47	783.8	1367	2011	1	บ่อยาง
OW7a	พิพิธภัณฑ์ราชรังค์	6.52	16.63	233	342.1	0.1	สมิหลา
OW7b	พิพิธภัณฑ์ราชรังค์	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.	บ่อยาง
OW8	โรงเรียนเทศบาล 1	6.54	35.15	286	420.3	0.2	สมิหลา

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ก-5 ระดับน้ำบาดาลของบ่อสังเกตการณ์

Well No	สถานี	ระดับน้ำ (รทก.)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
OW1	ม. เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	2.557	2.857	2.347	1.687
OW2	ศาลากลาง	2.576	3.066	2.766	2.076
OW3	เทศบาล	3.338	3.428	2.698	2.248
OW4a	สนามกอล์ฟทองใหญ่	-0.309	0.192	-0.369	-0.759
OW4b	สนามกอล์ฟทองใหญ่	-0.219	0.262	-0.319	-0.559
OW4c	สนามกอล์ฟทองใหญ่	-0.239	0.272	-0.359	-0.689
OW5	แหลมสนอ่อน	-0.064	-0.404	-0.754	-1.174
OW6	โรงเรียนวิเชียรชม	0.241	0.441	0.541	-0.689
OW7a	พิพิธภัณฑ์ราชรงค์	1.487	1.697	1.407	0.657
OW7b	พิพิธภัณฑ์ราชรงค์	Na.	Na.	Na.	Na.
OW8	โรงเรียนเทศบาล 1	1.748	1.758	1.468	1.208

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

ภาคผนวก ง
ข้อมูลการนำเข้าประปาและจำนวนประชากร

ตาราง ง-1 ข้อมูลสถิติการนำเข้าประปา บริเวณเทศบาลนครสงขลา

ปี พ.ศ.	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	รวม
2548	381,428	419,944	417,690	455,715	425,532	417,594	412,491	433,062	433,422	402,615	407,892	395,289	5,002,674
2549	365,896	390,679	381,482	428,946	422,670	427,120	444,221	452,081	438,882	421,008	414,183	416,601	5,003,769
2550	416,843	406,205	390,715	430,273	410,995	391,937	410,164	443,438	450,348	416,696	440,596	406,686	5,014,896
รวม	1,164,167	1,216,828	1,189,887	1,314,934	1,259,197	1,236,651	1,266,876	1,328,581	1,322,652	1,240,319	1,262,671	1,218,576	5,007,113

ที่มา : สำนักงานประปาเขต 5 การประปาส่วนภูมิภาค

ตาราง ง-2 สถิติจำนวนประชากร และบ้าน รายตำบล

ปี พ.ศ.	ชาย	หญิง	รวม	จำนวนบ้าน
2548	36,398	39,532	75,930	24,197
2549	36,007	38,868	74,875	24,589
2550	35,544	38,368	73,912	24,795
เฉลี่ย	35,983	38,923	74,906	24,527

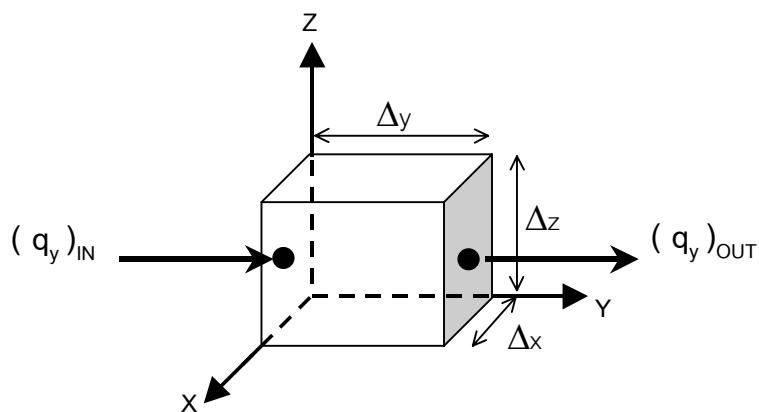
ที่มา : กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย

ภาคผนวก จ-1

สมการการไหลของน้ำใต้ดิน

สมการหลัก 2 สมการในการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข คือ กฎของดาร์ซีและกฎทรงมวล ดังกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.4 การไหลทั่วไป (3 มิติ) ของน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ (Constant density) ผ่านตัวกลางที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) และมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์เปลี่ยนแปลงตามทิศทาง (anisotropic) ภายใต้สถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.12) ในหัวข้อ 2.3.3-1 ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation)

สมการการไหลผ่านตัวกลางพรุนอ้างอิง (Representation Elementary Volume: REV) ดังรูป ข-1 ซึ่งมีขนาดใหญ่พอที่จะเป็นตัวแทนของคุณสมบัติของตัวกลางพรุนนั้นได้ และจะต้องมีขนาดเล็กพอที่จะทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำภายในมีค่าน้อยมากๆ โดยปริมาตรของ REV ที่มีลักษณะเป็นรูปลูกบาศก์มีค่าเท่ากับ $\Delta x \Delta y \Delta z$



รูปที่ ข-1 รูปแสดง Representation Elementary Volume: REV (Anderson and Woessner, 1992)

การไหลผ่าน REV กำหนดให้เป็นเทอมของอัตราการไหล (q) ที่แสดงในรูปแบบ 3 มิติทั่วไป คือ

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (1)$$

เมื่อ i_x, i_y, i_z คือ ยูนิตเวกเตอร์ในแนวแกน x, y, z

จากกฎทรงมวลของการไหลผ่านตัวกลางพรุนในสมการที่ (2-9) พิจารณาการไหลในแนวแกน y ของ REV ดังแสดงในรูป ช-1 การไหลเข้าสู่ REV ผ่านผนังด้าน $\Delta x \Delta z$ มีค่าเท่ากับ $(q_y)_{IN}$ และการไหลออกจาก REV ผ่านผนัง $\Delta x \Delta z$ มีค่าเป็น $(q_y)_{OUT}$ ถ้าเอาค่าการไหลออกลบการไหลเข้าในแนวแกน y จะได้

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \Delta x \Delta z \quad (2)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (3)$$

หรือกล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลผ่าน REV ในแนวแกน y คือ

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (4)$$

สำหรับการพิจารณาการไหลในแนวแกน x และแกน z จะใช้หลักการในทำนองเดียวกัน ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกักเก็บ ดังสมการ (5)

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{change in storage} \quad (5)$$

ในกรณีที่มีการสูญเสียน้ำจากการปั๊มหรือการใช้ น้ำ (Sink) หรือมีการเพิ่มเติม น้ำจาก Recharge หรือ injection well (source) ภายใน REV จะมีค่า Volumetric inflow rate คือ $R^* \Delta x \Delta y \Delta z$ เมื่อกำหนดให้ R^* มีค่าเป็นบวก ในกรณีที่เป็ค่า Source ซึ่งจะเพิ่มเข้าทางด้านซ้ายของสมการ (5) ดังนี้

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{change in storage} \quad (6)$$

พิจารณาด้านขวามือของสมการ (6) change in storage สามารถแทนค่าโดย Specific storage (S_s) ซึ่งกำหนดให้เป็นสัดส่วนของปริมาณน้ำซึ่งไหลออกจากการกักเก็บ ต่อหน่วยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ ต่อหน่วยปริมาตรของชั้นหินให้น้ำ

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (7)$$

โดยปกติ ค่า ΔV ในสมการ (7) มีค่าเป็นบวกเมื่อค่า Δh มีค่าเป็นลบ หรือกล่าวได้ว่า ปริมาณน้ำที่กักเก็บจะลดลงเมื่อแรงดันน้ำลดลง ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกักเก็บใน REV คือ

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (8)$$

รวมสมการ (6) และสมการ (8) เข้าด้วยกัน แล้วหารด้วย $\Delta x \Delta y \Delta z$ จะได้สมการ สุดท้ายคือ สมการ (9)

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = - S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (9)$$

สมการที่ได้นี้มีการใช้งานน้อยมาก เพราะไม่สามารถวัดค่า q ได้โดยตรง ดังนั้นจะใช้สมการของดาร์ซีช่วยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และค่า h ซึ่งค่าแรงดันน้ำสามารถวัดได้ โดยใช้สมการของดาร์ซีใน 3 มิติ เขียนได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} q_x &= - K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= - K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= - K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

เมื่อนำค่า q_x, q_y และ q_z ไปแทนที่ในสมการที่ (9) จะได้สมการหลักคือ

$$\frac{\partial}{\partial x}[-K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[-K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z}[-K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z}] + R = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (11)$$

เมื่อ K_x, K_y, K_z = ค่าความนำชลศาสตร์ในแนว x, y, z ตามลำดับ [LT^{-1}]
 h = ความสูงของระดับความดันน้ำ [L]
 S_s = ปริมาณการกักเก็บจำเพาะ (Specific storage) [L^{-1}]
 R = ปริมาณน้ำเข้า (Recharge) และ/หรือ ออก (Discharge) จาก
ระบบต่อหน่วยปริมาตรของชั้นน้ำต่อหน่วยเวลาที่น้ำเข้าและ/ หรือ ออก
[T^{-1}] (กรณีจำลองการไหลออก R มีค่าเป็นลบ)
 t = เวลา [T]

ภาคผนวก จ-2

สมการการเคลื่อนที่ของมวลสาร

สมการการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ (Constant density) ดังสมการที่ (2-13) ในหัวข้อ 2.3.3-2 สามารถแบ่งย่อยๆ ตามลักษณะของการเคลื่อนที่ได้ ดังนี้

$$\frac{\partial(nC^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[nD_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial X_j} \right] - \frac{\partial}{\partial X_i} (nV_i C^k) + q_s C_s^k + \sum_{n=1}^N R_n \quad (12)$$

$\frac{\partial(nC^k)}{\partial t}$	หมายถึง	อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารในระบบของแต่ละช่วงเวลา (Change in storage)
$\frac{\partial}{\partial X_i} \left[nD_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial X_j} \right]$	หมายถึง	อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารอันเนื่องจากการแพร่กระจาย (Dispersion and diffusion)
$-\frac{\partial}{\partial X_i} (nV_i C^k)$	หมายถึง	อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารอันเนื่องจากการพา (Advection in/outflow)
$q_s C_s^k$	หมายถึง	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารอันเนื่องจากการไหลเข้าหรือออกของมวลสาร (Source/sink)
$\sum_{n=1}^N R_n$	หมายถึง	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารอันเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction)

พจน์ทางซ้ายมือของสมการที่ (12) สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 พจน์ ดังนี้

$$\frac{\partial(nC^k)}{\partial t} = n \frac{\partial C^k}{\partial t} + C^k \frac{\partial n}{\partial t} \quad (13)$$

พจน์ของ $\frac{\partial n}{\partial t}$ หมายถึง อัตราของความเปลี่ยนแปลงตามเวลาในแหล่งกักเก็บน้ำใต้ดิน มีหน่วยเป็น T^{-1} สามารถเขียนแทนด้วย q'_s นำไปแทนที่ใน สมการที่ (13) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial(nC^k)}{\partial t} = n \frac{\partial C^k}{\partial t} + q'_s C^k \quad (14)$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวลสารอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมี ได้รวมผลของปฏิกิริยาทางชีวเคมีและธรณีเคมีไว้แล้วดังสมการที่ (15)

$$\sum R_n = -\rho_b \frac{\partial \bar{C}^k}{\partial t} - \lambda_1 n C^k - \lambda_2 \rho_b \bar{C}^k \quad (15)$$

เมื่อ	$\sum R_n$	คือ	ผลรวมการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลสารอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมี [$ML^{-3}T^{-1}$]
	C^k	คือ	ความเข้มข้นของมวลสาร k ที่ละลายในน้ำ [ML^{-3}]
	n	คือ	ความพรุนของหิน [ไม่มีหน่วย]
	ρ_b	คือ	ค่า bulk density ของชั้นหินใต้น้ำ [ML^{-3}]
	λ_1	คือ	First order reaction rate ของมวลสารในสถานะสารละลาย [T^{-1}]
	λ_2	คือ	First order reaction rate ของมวลสารในสถานะของแข็ง [T^{-1}]
	\bar{C}^k	คือ	ความเข้มข้นของมวลสาร k ที่ถูกดูดซับไว้ [MM^{-1}]

นำสมการที่ (14) และ (15) ไปแทนที่ในสมการที่ (12) แล้วจัดรูปให้ดูง่ายได้ดังนี้

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[n D_{ij} \frac{\partial C}{\partial X_{ij}} \right] - \frac{\partial}{\partial X_i} (n V_i C) + q_s C_s - q'_s C - \lambda_1 n C - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \quad (16)$$

สมการที่ (16) เป็นพื้นฐานของการอนุรักษ์มวลสาร เมื่อเขียนพจน์ทางซ้ายใหม่

$$Rn \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[nD_{ij} \frac{\partial C}{\partial X_{ij}} \right] - \frac{\partial}{\partial X_i} (nV_i C) + q_s C_s - q'_s C - \lambda_1 nC - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \quad (17)$$

$$\text{โดยที่ } R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \quad (18)$$

ซึ่ง R จากสมการที่ (18) หมายถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหน่วง (retardation factor) ให้มวลสารเคลื่อนที่ช้าลง

สำหรับค่า V_i ในสมการที่ (17) คือความเร็วของการไหลที่ได้มาจากกฎของ Darcy เมื่อพิจารณาในพจน์ของการแพร่กระจายหรือ Dispersion ในสมการที่ (12) สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายได้ดังนี้

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{V_x^2}{|V|} + \alpha_{TH} \frac{V_y^2}{|V|} + \alpha_{TV} \frac{V_z^2}{|V|} + D^* \quad (19a)$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{V_y^2}{|V|} + \alpha_{TH} \frac{V_x^2}{|V|} + \alpha_{TV} \frac{V_z^2}{|V|} + D^* \quad (19b)$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{V_z^2}{|V|} + \alpha_{TV} \frac{V_x^2}{|V|} + \alpha_{TV} \frac{V_y^2}{|V|} + D^* \quad (19c)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{V_x V_y}{|V|} \quad (19d)$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{V_x V_z}{|V|} \quad (19e)$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{V_y V_z}{|V|} \quad (19f)$$

เมื่อ	D_{ii}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย $[L^2T^{-1}]$
	D_{ij}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวขวางจาก i ไป j $[L^2T^{-1}]$
	D^*	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายสัมฤทธิ์ผล [effective molecular diffusion coefficient, L^2T^{-1}]

α_L	คือ	ค่า longitudinal dispersivity [L]
α_{TH}	คือ	ค่า horizontal transverse dispersivity [L]
α_{TV}	คือ	ค่า vertical transverse dispersivity [L]
V_x, V_y, V_z	คือ	ความเร็วการไหลตามแนวแกน X, Y และ Z [LT^{-1}]
$ V $	คือ	อัตราเร็วของการไหล [$=\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$, LT^{-1}]

สำหรับค่าความเข้มข้นของมวลสารที่ถูกดูดซับไว้ หรือ \bar{C} สามารถแยกคำนวณได้ตามลักษณะการดูดซับ ดังนี้

-กรณีการดูดซับเป็นแบบเชิงเส้นตรง (Linear sorption isotherm) สามารถอนุมานได้ว่าค่าความเข้มข้นของมวลสารที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความเข้มข้นที่ละลายน้ำของมวลสารนั้น หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\bar{C} = K_d C \quad (20)$$

โดย K_d หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (distribution coefficient, L^3M^{-1})

-กรณีการดูดซับไม่เป็นแบบเชิงเส้นตรง (Non-linear sorption isotherm) ซึ่งสามารถแยกย่อยออกได้เป็น 2 กรณีย่อย คือ แบบ Freundlich และ Langmuir โดย

การดูดซับแบบ Freundlich ค่าความเข้มข้นของมวลสารที่ถูกดูดซับดังนี้

$$\bar{C} = K_f C^a \quad (21)$$

โดย K_f หมายถึงค่าคงที่ของ Freundlich (L^3M^{-1})^a

a หมายถึงค่า Freundlich exponent ซึ่งไม่มีหน่วย

ซึ่งค่าคงที่ทั้งสองนี้ได้มาจากการทดลอง

ส่วนการดูดซับแบบ Langmuir สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\bar{C} = \frac{K_L \bar{S} C}{1 + K_L C} \quad (22)$$

เมื่อ K_L หมายถึงค่าคงที่ของ Langmuir (L^3M^{-1})
 \bar{S} หมายถึงค่าความเข้มข้นทั้งหมดที่มีอยู่ในพื้นที่ (MM^{-1})

ภาคผนวก จ-3

สมการที่ใช้ใน SEAWAT

SEAWAT เป็นโปรแกรมย่อยหนึ่งใน Visual MODFLOW เป็นการรวมระหว่างโปรแกรมการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของมวลสารเข้าด้วยกัน แนวคิดการประยุกต์ใช้สมการใน SEAWAT ประกอบด้วยการใช้กฎของดาร์ซี (Darcy's law) ในสมการการไหลของน้ำใต้ดิน และกฎของฟิคค์ (Fick's law) ในสมการการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน

สมการการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของมวลสาร กรณีที่มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของน้ำจืดและน้ำเค็ม (Variable density) นั้นซึ่งถูกใช้ใน SEAWAT ดังแสดงในสมการที่ (2-14) และ (2-15) ในหัวข้อ 2.3.4 มีรายละเอียดที่มาของสมการดังนี้

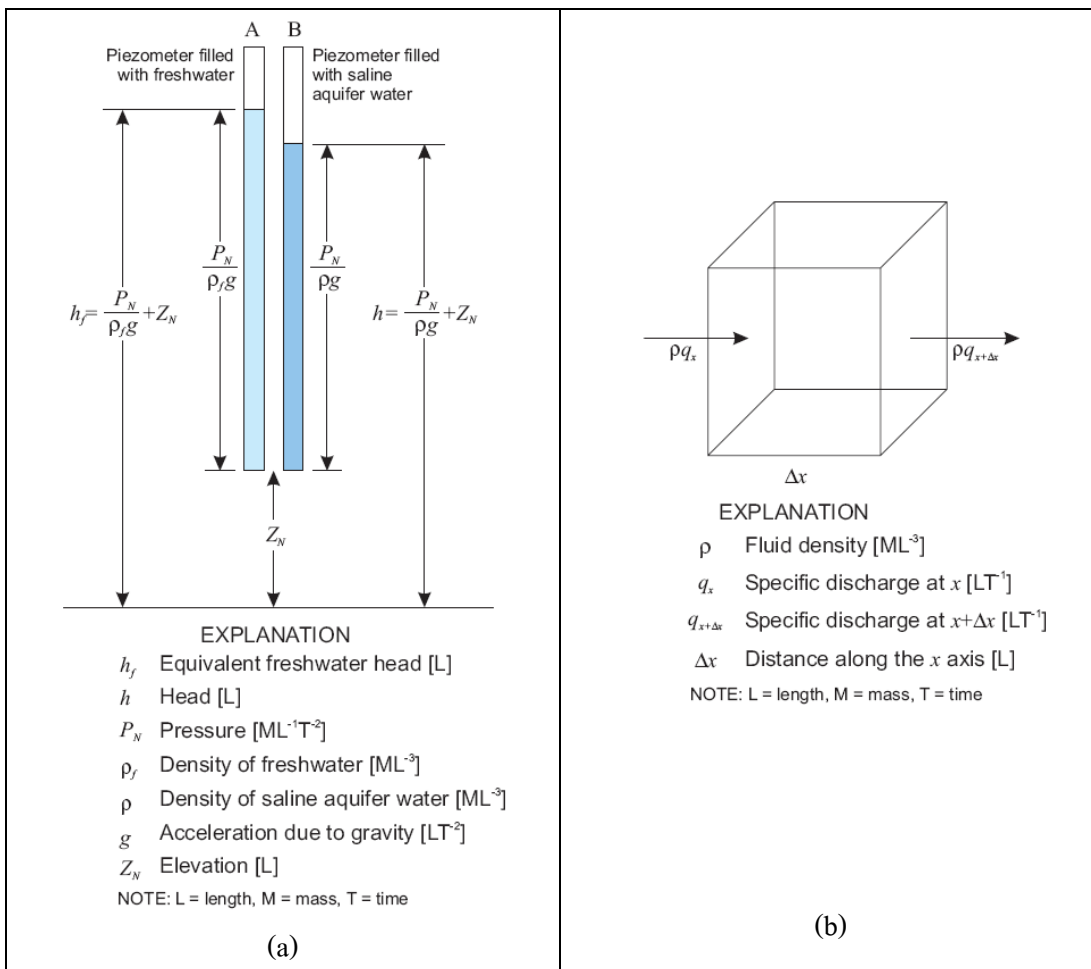
พิจารณารูปที่ ข-2a ประกอบด้วย Piezometer A เต็มน้ำจืดและ Piezometer B เต็มน้ำเค็ม ความแตกต่างของแรงดันน้ำใน Piezometer ทั้งสองสามารถแสดงความสัมพันธ์ในเทอมของแรงดันได้ดังสมการที่ (23) และ (24) และในเทอมของความหนาแน่นได้ดังสมการ (25) และ (26) ตามลำดับ

$$h_f = \frac{P_N}{\rho_f g} + Z_N \quad (23)$$

$$h = \frac{P_N}{\rho g} + Z_N \quad (24)$$

$$h_f = \frac{\rho}{\rho_f} h - \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} Z \quad (25)$$

$$h = \frac{\rho_f}{\rho} h_f - \frac{\rho - \rho_f}{\rho} Z \quad (26)$$



รูปที่ ๒-2 (a) Two piezometers, with freshwater and saline water

(b) Representative Elementary Volume (REV) in Porous Medium

Governing Equation for Groundwater Flow

จากกฎทรงมวลของการไหลผ่านตัวกลางพรุน พิจารณารูปที่ ๒-2b จะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกได้ดังสมการที่ (27)

$$-\nabla \cdot (\rho \bar{q}) + \bar{\rho} q_s = \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} \tag{27}$$

- เมื่อ
- ρ = ความหนาแน่นของมวลสาร (Fluid density) [ML^{-3}]
 - $\bar{\rho}$ = ความหนาแน่นของน้ำที่ไหลเข้า (Source, +) หรือไหลออก (Sink, -)

n	=	ความพรุนของวัตถุตัวกลาง (Porosity) [ไม่มีหน่วย]
t	=	เวลา (Time) [T]
q_s	=	อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้า (Source, +) หรือไหลออก (Sink, -) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของชั้นหินอุ้มน้ำ [T ⁻¹]
∇	=	ความลาดชันในแนว x, y, z ตามลำดับ (Gradient, $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$)
\bar{q}	=	Specific discharge vector [LT ⁻¹]

พจน์ทางซ้ายมือของสมการที่ (27) คือการปริมาตรไหลผ่านสู่ REV มีค่าเท่ากับ $-\nabla \cdot (\rho \bar{q})$ บวกกับอัตราการสูญเสีย $\bar{\rho} q_s$ จากการปั๊มหรือการใช้น้ำ (Sink) หรือมีการเพิ่มเติมจาก Recharge หรือ injection well (source) ภายใน REV ส่วนพจน์ทางขวามือสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 พจน์ ดังสมการที่ (28)

$$\frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = \rho \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (28)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงความพรุนต่อเวลาในเทอมของแรงดันแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (29)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (29)$$

ภายใต้เงื่อนไขพบว่า ความหนาแน่นของของเหลวเป็นฟังก์ชันกับแรงดัน (P) และความเข้มข้นมวลสาร (C) ดังสมการที่ (30) และ (31) ตามลำดับ

$$\rho = f(P, C) \quad (30)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (31)$$

แทนค่า สมการที่ (29) และ (31) ในสมการที่ (28) จะได้ดังสมการที่ (32)

$$\frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = \rho \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial n}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (32)$$

สมการที่ (32) สองพจน์แรกของเทอมขวามือคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำใต้ดิน ส่วนพจน์ที่สามคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงในความเข้มข้นของมวลสาร

ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน (Porosity) ความดัน (Pressure) และความสามารถในการอัดตัว (Compressibility) ของวัตถุตัวกลางพรุน ดังสมการที่ (33) (Bear, 1979)

$$\xi = \frac{1}{(1-n)} \frac{\partial n}{\partial P} \quad (33)$$

เมื่อ ξ = ความสามารถในการอัดตัวของวัตถุตัวกลางพรุน [$M^{-1}LT^2$]

ส่วนความสามารถในการอัดตัวของน้ำ (Coefficient of water compressibility) สามารถหาได้จากสมการที่ (34)

$$\xi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (34)$$

แทนค่าสมการที่ (33) และ (34) ในสมการที่ (32) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (35)

$$\frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = \rho(\xi[1-n] + \xi n) \frac{\partial P}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (35)$$

พจน์ $\rho(\xi[1-n] + \xi n)$ คือปริมาตรน้ำกักเก็บ หรือเขียนใหม่ในเทอมความดันได้ดังสมการที่ (36)

$$S_p = (\xi[1-n] + \xi n) \quad (36)$$

เมื่อ S_p = ค่าการกักเก็บจำเพาะ (Specific storage) ในเทอมของความดัน [$M^{-1}LT^2$]

แทนค่าสมการ (36) ในสมการ (35) จะได้

$$\frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (37)$$

แทนค่าสมการ (37) ในสมการ (27) จะได้

$$-\nabla \cdot (\rho \bar{q}) + \bar{\rho} q_s = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (38)$$

สมการที่ (38) คือสมการ Partial differential ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลในน้ำใต้ดินผ่านตัวกลางพรุนแบบความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Variable density)

Darcy's Law for Variable-Density Ground-water Flow

การหาค่าปริมาณน้ำสูญเสียจำเพาะ (Specific discharge) ผ่านตัวกลางพรุนแบบความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Variable density) สามารถหาได้จาก

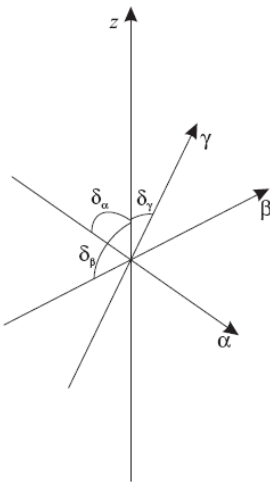
$$q_x = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (39)$$

$$q_y = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (40)$$

$$q_z = -\frac{k_z}{\mu} \left[\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \right] \quad (41)$$

เมื่อ	q_x, q_y, q_z	= ค่าปริมาณน้ำสูญเสียจำเพาะตามแนว x, y, z ตามลำดับ
	μ	= ค่าความหนืด (Dynamic viscosity) [ML ⁻¹ T ⁻¹]
	k_x, k_y, k_z	= ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านตามแนว x, y, z ตามลำดับ [L ²]
	g	= แรงโน้มถ่วงของโลก [LT ⁻²]

ถ้าพิจารณาตามแนวการซึมผ่านทั้งแนวราบและแนวตั้ง (รูปที่ ซ-4) สามารถหาค่าปริมาณน้ำสูญเสียจำเพาะ (Specific discharge) ได้ดังนี้



รูปที่ ซ-4

$$q_{\alpha} = -\frac{k_{\alpha}}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial \alpha} + \rho g \cos \delta_{\alpha} \right) \quad (42)$$

$$q_{\beta} = -\frac{k_{\beta}}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial \beta} + \rho g \cos \delta_{\beta} \right) \quad (43)$$

$$q_{\gamma} = -\frac{k_{\gamma}}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial \gamma} + \rho g \cos \delta_{\gamma} \right) \quad (44)$$

จากรูปที่ ซ-2 สามารถหาค่าความดันโดยจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (45)

$$P = \rho_f g (h_f - z) \quad (45)$$

จากรูปที่ ซ-4 สามารถแก้สมการ (45) ใหม่ได้ดังสมการ (46)

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha} = \rho_f g \frac{\partial h_f}{\partial \alpha} - \rho_f g \frac{\partial z}{\partial \alpha} \quad (46)$$

แทนค่าสมการ (46) ในสมการ (42) โดยให้ $\cos \delta_\alpha = \frac{\partial z}{\partial \alpha}$ จะได้

$$q_\alpha = \frac{k_\alpha}{\mu} \left[\rho_f g \frac{\partial h_f}{\partial \alpha} - \rho_f g \frac{\partial z}{\partial \alpha} + \rho g \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right] \quad (47)$$

จัดรูปค่า K_f ใหม่ตามทิศทางในรูป ข-4 จะได้

$$K_{f\alpha} = \frac{k_\alpha \rho_f g}{\mu_f} \quad (48)$$

จัดรูปสมการ (42)-(44) ใหม่ดังนี้

$$q_\alpha = -K_{f\alpha} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right] \quad (49)$$

$$q_\beta = -K_{f\beta} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \beta} \right] \quad (50)$$

$$q_\gamma = -K_{f\gamma} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right] \quad (51)$$

และ

$$q_x = -K_{fx} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial x} \right] \quad (52)$$

$$q_y = -K_{fy} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial y} \right] \quad (53)$$

$$q_z = -K_{fz} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial z} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \right] \quad (54)$$

Governing Equation for Flow in Terms of Freshwater Head

จากสมการที่ (38) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$-\frac{\partial}{\partial \alpha}(\rho \bar{q}_\alpha) - \frac{\partial}{\partial \beta}(\rho \bar{q}_\beta) - \frac{\partial}{\partial \gamma}(\rho \bar{q}_\gamma) = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \quad (55)$$

และจากความสัมพันธ์สมการ (45) แทนค่าสมการ (49)-(51) ในสมการ (55) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{f\alpha} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right] \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right] \right) = \rho S_p g \rho_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \end{aligned} \quad (56)$$

จากสมการ (36) และ (34) จะได้ว่า

$$\xi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} \approx \xi_f = \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (57)$$

$$S_f = g \rho_f [\xi(1-n) + \xi_f n] \quad (58)$$

แทนค่าสมการ (36) และ (57) ลงในสมการ (56) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{f\alpha} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right] \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right] \right) = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \end{aligned} \quad (59)$$

สมการที่ (59) คือสมการในเทอมแรงดันน้ำที่ใช้ใน SEAWAT

Concentration and Density

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความเข้มข้นของน้ำเค็มถูกนำเสนอโดย Baxter and Wallace (1916) ดังสมการ (60)

$$\rho = \rho_f + EC \quad (60)$$

เมื่อ E = ค่าคงที่ประมาณ 0.7143
 C = ปริมาณความเข้มข้นของน้ำเค็ม [ML⁻³] (61)

สมการ (60) จัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial C} = E \quad (62)$$

แทนค่าสมการ (62) ใน (59) จะได้

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{f\alpha} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right] \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right] \right) = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + nE \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \end{aligned} \quad (63)$$

ภาคผนวก จ

การคำนวณหาปริมาณการเติมน้ำ

การคำนวณหาปริมาณการเติมน้ำ (Recharge) มีขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดค่า

- ค่าปริมาณการเก็บกักน้ำสูงสุดของดิน (Maximum Soil Water Storage, S_{max}) หมายความว่าถ้ามีปริมาณน้ำมากกว่าค่า S_{max} น้ำจะล้นจากชั้นดิน อาจจะไหลบนผิวดินเป็นน้ำท่า หรืออาจซึมลงใต้ดิน

- ค่าปริมาณการเก็บกักน้ำต่ำสุดของดิน (Minimum Soil Water Storage, S_{min}) หมายความว่าน้ำในดินมีน้อยมาก ทำให้มีแรงยึดติดกับเม็ดดินสูงมาก ในสภาวะปกติจะไม่สูญเสีย น้ำออกจากจากดิน

- ค่าปริมาณการเก็บกักเริ่มต้น (Initial Soil Water Storage, S_0) เป็นการกำหนดค่า การเก็บกักน้ำของชั้นดินในเดือนแรกของการคำนวณ ซึ่งในการคำนวณเราได้เลือกเดือนมกราคม เป็นเดือนเริ่มต้น เนื่องจากเดือนมกราคมเป็นเดือนที่อยู่ในช่วงปลายฤดูฝนดินมีความอิ่มตัวเต็มที่ ทำให้มั่นใจได้ว่าค่าปริมาณการเก็บกักเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับปริมาณการเก็บกักสูงสุด

- ค่าการระเหยจริงเริ่มต้น (Initial Actual Evaporation, ETa_0) เนื่องจากเดือนเริ่มต้น เป็นเดือนปลายฤดูฝน ปริมาณน้ำเก็บกักในดินยังมีมาก ดังนั้นค่าการคายระเหยจริงของเดือนนี้จึงมีค่าเท่ากับศักย์ของการระเหยของเดือนเดียวกัน นั่นคือ $ETa_0 = ETp_0$

2) คำนวณปริมาณการเก็บกักของน้ำในดิน

เนื่องจากเลือกเดือนมกราคมเป็นเดือนเริ่มต้น ดินมีความอิ่มตัวเต็มที่ กำหนดให้ ปริมาณการเก็บกักในเดือนแรกเท่ากับการเก็บกักสูงสุด ($S_0 = S_{max}$) ดังนั้นในการคำนวณปริมาณการ เก็บกักน้ำในดินจะคำนวณตั้งแต่เดือนที่สองเป็นต้นไป โดยจะพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างปริมาณ ฝนของเดือนนั้น (R_m) กับศักย์การคายระเหยของเดือนนั้น (ETp_m) โดยมี 2 กรณี คือ

1. กรณีที่ปริมาณฝนมากกว่าศักย์การระเหย จะได้ปริมาณการเก็บกักในดิน เป็นปริมาณฝนในเดือนนั้น ลบด้วยศักย์การระเหยในเดือนนั้น บวกกับปริมาณการเก็บกักของเดือน ที่ผ่านมา แต่ทั้งนี้ปริมาณการเก็บกักเดือนนั้นๆ (S_m) จะต้องไม่มากกว่าปริมาณการเก็บกักสูงสุด

$$S_m = \min[(R_m - ETp_m + S_{m-1}), S_{max}]$$

2. กรณีที่ปริมาณฝนน้อยกว่าศักยภาพการคายระเหยจะได้ปริมาณการเก็บกักเป็นแฟคเตอร์ (Factor) ของปริมาณการเก็บกักของเดือนที่ผ่านมา ซึ่งจากการทดลองของ Thornthwaite (Dingman, 1994) จะได้ค่าแฟคเตอร์เป็น $\exp(-((ETp_m - R_m)/S_{max}))$ อย่างไรก็ตามปริมาณการเก็บกักจะไม่น้อยไปกว่าปริมาณเก็บกักต่ำสุด (S_{min})

$$S_m = \max [(S_{m-1}) \exp (-((ETp_m - R_m)/ S_{max})), S_{min}]$$

3) จำนวนปริมาณการระเหยจริง

ปริมาณการระเหยจริง (ETa) ขึ้นอยู่กับปริมาณฝน ศักยภาพการระเหย และปริมาณการเก็บกักในดิน สำหรับเดือนแรกของการคำนวณ ได้ใช้เดือนมกราคมซึ่งเป็นเดือนที่เกือบปลายฤดูฝนซึ่งมีปริมาณฝนมากกว่าปริมาณการเก็บกักในดินสูง ดังนั้นเราสามารถกำหนดได้ว่าปริมาณการระเหยจริงของเดือนนี้มีค่าเท่ากับศักยภาพการระเหยของเดือนเดียวกัน สำหรับเดือนต่อไป มีวิธีการคำนวณ ดังนี้

-กรณีที่ปริมาณฝนมากกว่าศักยภาพการระเหย ปริมาณการระเหยจริงในเดือนนั้นๆ (ETa_m) จะต้องเท่ากับศักยภาพการระเหยของเดือนนั้นๆ

$$ETa_m = ETp_m$$

-กรณีที่ปริมาณฝนน้อยกว่าศักยภาพการระเหย ปริมาณการระเหยจริงจะเท่ากับปริมาณฝนบวกด้วยปริมาณการเก็บกักของเดือนที่ผ่านมาลบด้วยปริมาณการเก็บกักของเดือนนั้นๆ

$$ETa_m = R_m + S_{m-1} - S_m$$

4) จำนวนปริมาณการไหลออก (out flow)

ปริมาณการไหลออกประกอบด้วย การไหลในลำน้ำหรือน้ำท่า (Stream flow) และการซึมลงสู่หน้าดิน (groundwater recharge)

- กรณีที่ปริมาณฝนมากกว่าปริมาณการระเหยจริง ปริมาณการไหลออกในเดือนนั้นๆ (OUT_m) จะมีค่าเท่ากับปริมาณฝนลบด้วยปริมาณการระเหยจริงลบด้วยปริมาณการเก็บกักที่

เปลี่ยนแปลง (ΔS) ซึ่งปริมาณการเก็บกักที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับการเก็บกักของเดือนนี้ลบด้วย การเก็บกักของเดือนที่ผ่านมา

$$OUT_m = R_m - ETP_m - \Delta S_m$$

- กรณีที่ปริมาณฝนน้อยกว่าปริมาณการระเหยจริง จะไม่มีการไหลออก ทั้งนี้ เนื่องจากฝนจะระเหยไปหมด ($OUT_m = 0$)

$$\text{ซึ่ง} \quad \Delta S = S_m - S_{m-1}$$

และ OUT_m คือ ปริมาณการไหลออกในเดือนนั้น

5) คำนวณปริมาณการซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดิน (groundwater recharge)

เนื่องจากบางเดือนปริมาณการระเหยมีค่ามากกว่าปริมาณฝน ดังนั้นน้ำในดินส่วนใหญ่จะระเหยออกไป สำหรับเดือนที่มีฝนมากกว่าคายระเหย น้ำที่เหลือจากการเก็บกักในดิน บางส่วนก็จะกลายเป็นน้ำท่าและบางส่วนก็จะซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดิน ในกรณีที่มียน้ำไหลในลำน้ำใน เดือนที่มีปริมาณการระเหยสูงกว่าปริมาณฝน นั้นเป็นเพราะการซึมออกจากระบบน้ำใต้ดินเข้าสู่ลำน้ำ ดังนั้นการคำนวณปริมาณการซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดินมีลำดับการคำนวณ ดังนี้

- พิจารณาเฉพาะเดือนที่มีการไหลออกจากชั้นดิน โดยรวมปริมาณการไหลออก รายเดือน (OUT_m) ทุกๆ เดือน จะได้ปริมาณการไหลออกจากชั้นดินรายปี (OUT_y)

- จากสถิติน้ำท่า เลือกรวมปริมาณน้ำท่าเฉพาะเดือนที่มีการไหลออกจากชั้นดิน ($STREAM_{mf}$) สำหรับทุกเดือนที่มีการไหลออกจากชั้นดิน ปริมาณการไหลออกจากชั้นดินลบด้วย ปริมาณน้ำท่า จะเป็นปริมาณการซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดินในช่วงเดือนที่มีการไหลออกจากชั้นดิน (GW_{mf})

$$GW_{mf} = OUT_y - STREAM_{mf}$$

- ในช่วงเดือนที่ไม่มีมีการไหลออกจากชั้นดินแต่ยังมีน้ำไหลในลำน้ำ เพราะน้ำจากระบบน้ำใต้ดินซึมเข้าสู่ลำน้ำ ดังนั้นเราอาจคำนวณปริมาณน้ำที่เติมเข้าสู่ระบบน้ำใต้ดินสุทธิ (GW_{net}) ได้จากปริมาณไหลออกจากชั้นดินรายปี (OUT_y) ลบด้วยปริมาณน้ำท่ารายปี ($STREAM_y$)

$$GW_{net} = OUT_y - STREAM_y$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายสุพล สันติเจริญกุล

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5010120079

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษีก้นกฏคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2550 – 2552

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

สุพล สันติเจริญกุล, ธนิต เฉลิมยานนท์ และ ธนันท์ ชูอุปการ. (2553). น้ำบาดาลของเทศบาลนครสงขลา: คุณภาพน้ำและแบบจำลองสถานะคงที่: การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, 22-23 เมษายน 2553 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา.

สุพล สันติเจริญกุล และ ธนิต เฉลิมยานนท์. (2553). แบบจำลองน้ำบาดาลของเทศบาลนครสงขลา: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี.