



การศึกษาการรุกของน้ำเค็มในชั้นน้ำใต้ดินในแอ่งหาดใหญ่
โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

**Study of Seawater Intrusion into Aquifers in Hat Yai Basin
Using a Mathematical Model**

อรุณ ลูกจันทร์

Arun Lookjan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการรุกของน้ำเค็มในชั้นน้ำใต้ดินในแอ่งหาคีใหญ่โดยใช้
 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผู้เขียน นายอรุณ ลูกจันทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เถลิงยานนท์)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตัญญ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีรักษ์กุล)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เถลิงยานนท์)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีรักษ์กุล)

.....กรรมการ
 (ดร.พัชรศักดิ์ อาลัย)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการรุกของน้ำเค็มในชั้นน้ำใต้ดินในแอ่งหาดใหญ่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
ผู้เขียน	นายอรุณ ลูกจันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

แอ่งหาดใหญ่มีลักษณะเป็นแอ่งที่ราบระหว่างหุบเขา บริเวณกลางแอ่งมีการสะสมตัวของตะกอนยุคควอเทอร์นารี น้ำบาดาลส่วนใหญ่ได้จากชั้นตะกอนหินร่วน ซึ่งประกอบด้วยชั้นกรวด ทราย และดินเหนียว สามารถแบ่งชั้นน้ำบาดาลได้เป็น 3 ชั้น ได้แก่ชั้นน้ำหาดใหญ่ ชั้นน้ำคูเต่า และชั้นน้ำคองหงส์ ตามลำดับ ปัจจุบันพบว่าการสูบน้ำบาดาลจากแอ่งหาดใหญ่มาใช้มากขึ้น ซึ่งอาจทำให้สมดุลระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและปริมาณน้ำที่สูบออกจากแอ่งบาดาลเสียไป และอาจส่งผลให้เกิดการรุกคืบของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาสู่ชั้นน้ำบริเวณเมืองหาดใหญ่ได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาระบบการไหล สมดุลน้ำบาดาลและขอบเขตการแพร่กระจายของคลอไรด์ในสภาวะการสูบน้ำใช้ในปัจจุบัน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณคาดการณ์สถานการณ์จำลอง 3 มิติ ทำการปรับค่าและตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้ระดับน้ำและคุณภาพน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ 47 บ่อ แบบจำลองถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายการรุกคืบของน้ำเค็มสู่ชั้นน้ำบาดาลในกรณีที่มีการสูบน้ำเพิ่มขึ้นในอนาคต

ผลการจำลองการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าการไหลของน้ำบาดาลมีทิศการไหลจากพื้นที่เดิมน้ำทิศตะวันออก ทิศตะวันตกและทิศใต้ ไปยังที่ราบตอนกลางของพื้นที่แล้วไหลออกสู่ทะเลสาบสงขลา ผลการศึกษาสมดุลน้ำบาดาลปี 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 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อ

ปี และหินแข็ง 5.06 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณน้ำไหลออกจากแบบจำลองทั้งหมด 115.00 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ผลจากการจำลองการรุกค้ำของน้ำเค็มพบว่า ในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบันบริเวณที่มีการกระจายตัวของคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐานถูกจำกัดขอบเขตอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาและริมทะเลอ่าวไทยของชั้นน้ำบาดใหญ่ 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 ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่กันชน (Buffer zone) ส่วนชั้นน้ำกูเต่าและคอหงส์พบว่าปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี ส่วนผลการจำลองกรณีกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่พบว่า การเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงเข้าสู่เขตเทศบาลหาดใหญ่เกิดขึ้นน้อยเนื่องจากยังมีทิศทางไหลของน้ำใต้ดินไปสู่ทะเลสาบสงขลา

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

คำหลัก : แอ่งหาดใหญ่, การรุกค้ำของน้ำเค็ม, สมดุลน้ำใต้ดิน, ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย

Thesis Title	Study of Seawater Intrusion into Aquifers in Hat Yai Basin Using a Mathematical Model
Author	Mr. Arun Lookjan
Major Program	Civil Engineering (Geotechnical Engineering)
Academic Year	2009

ABSTRACT

A flood plain part of the Hat Yai basin, located at the center of the basin, was filled with quaternary deposits. Groundwater is mainly withdrawn from three main unconsolidated aquifers namely; Hat Yai aquifer, Kutao aquifer, and Korhong aquifer. Recent increase in groundwater pumpage may overcome the groundwater balance resulting in the seawater intrusion from the Songkhla Lake into Hat Yai City. 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 using a mathematical model 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 47 monitoring wells from 2002 to 2008.

Transient simulation results showed that the direction of groundwater flow was from the recharge areas in the east, the west and the south toward the center of the basin and to the Songkhla Lake. Groundwater balance results in 2007 revealed that inflows from recharge areas, rainfall, storage, rivers, and the Songkhla Lake were 53.40, 28.20, 23.96, 7.72, and 1.72 Mm^3/yr , respectively. The outflows from the model to storage, pumping wells, rivers, the Songkhla Lake, and recharge areas, were 66.88, 25.03, 10.20, 7.83, 5.06 Mm^3/yr , respectively. Total inflow and outflow were 115.00 Mm^3/yr .

Seawater intrusion simulation results indicated that for current pumpage, the areas that the Hat Yai aquifer was affected by higher-than-standard chloride concentration were limited in the adjacent areas of the Songkhla Lake, namely: Ban Nong Hin, Ban Kaun, Ban Bang Hnode and Ban Dee Hlung Nok. The seawater affected areas approximately covered the distance of 7.59 kilometers inland from the Songkhla Lake There was so-called "the buffer zone" at which

fresh groundwater was found in the Hat Yai aquifer. The buffer zone covered the distance about 8 kilometers from seawater affected area to Hat Yai City. Fresh groundwater was observed from both Kutao and Korhong aquifers in all areas. Variable density simulation results showed that there was no significant migration of chloride from chloride affected area toward Hat Yai City because the direction of flow was still outward to the Songkhla Lake.

Simulation results also indicated that for projected groundwater pumpage of 5 and 10% annual increment, a drawdown of 5 meters at Hat Yai City was observed at Hat Yai City within 8 and 6 years, respectively. Seawater intrusion into Hat Yai City did not observed as the change of chloride concentration was less than 50 mg/L and still lower than groundwater standard. Groundwater safe yield of the Hat Yai Basin evaluated using the developed model was 36 Mm³/yr or 98,630 cubic meters per year.

Keywords : Hat Yai basin, 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 ทบทวนเอกสาร	
2.1 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา	4
2.1.1 ที่ตั้งและขอบเขต	4
2.1.2 สภาพภูมิประเทศ	6
2.1.3 สภาพภูมิอากาศ	6
2.1.4 สภาพอุทกวิทยา	7
2.1.5 การใช้ประโยชน์ที่ดิน	9
2.1.6 ธรณีสัณฐานและธรณีโครงสร้าง	11
2.1.7 ลักษณะอุทกธรณีวิทยา	14
2.1.8 แหล่งน้ำบาดาลแอ่งหาดใหญ่	17
2.1.9 ระดับน้ำและทิศทางการไหลของน้ำบาดาล	18
2.1.10 ศักยภาพน้ำบาดาลในแอ่งหาดใหญ่	18
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับน้ำบาดาลและสารปนเปื้อน	19
2.2.1 ชั้นหินอุ้มน้ำ	19
2.2.2 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำ	20
2.2.3 หลักการรุกของน้ำเค็ม	23
2.2.4 การไหลของน้ำใต้ดิน	26
2.2.5 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.6 การประเมินศักยภาพแอ่งน้ำบาดาล	31
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	33
2.3.1 แบบจำลอง Visual MODFLOW (v.4.1 pro)	34
2.3.2 SEAWAT	34
2.3.3 สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ใน Visual MODFLOW	35
2.3.4 Variable Density Equation	38
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
3 งานรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ	
3.1 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา	45
3.2 การประเมินอัตราการเพิ่มเติมน้ำ (Recharge)	53
3.3 การประเมินการใช้น้ำบาดาล	58
4 งานทดสอบและเก็บข้อมูลภาคสนาม	
4.1 การสำรวจค่าพิกัดและค่าระดับบ่อบาดาล	60
4.2 การติดตามวัดระดับน้ำและตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาล	64
4.3 การสูบน้ำทดสอบ (Pumping Test)	75
5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	
5.1 กำหนดวัตถุประสงค์ (Define Purpose)	77
5.2 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model)	77
5.3 เลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Program Selection)	79
5.4 การสร้างแบบจำลอง (Model Design)	79
5.4.1 การออกแบบกริด (Grid Design)	79
5.4.2 การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง (Boundary Condition)	81
5.4.3 สภาพขอบเขตและช่วงเวลาการคำนวณ (Time Step and Stress Period)	81
5.5 การจำลองการไหลในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient State Flow)	85
5.5.1 อัตราการเติมน้ำ (Recharge Rate)	85
5.5.2 คุณสมบัติทางชลศาสตร์	85
5.5.3 ระดับแรงดันน้ำเริ่มต้น (Initial Head)	85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5.4 การใช้น้ำบาดาล (Groundwater Usage)	86
5.6 การจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม (Mass Transport Modeling)	88
5.6.1 ความเข้มข้นคลอไรด์เริ่มต้น (Initial Chloride Concentration)	89
5.6.2 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำ (Dispersion)	89
5.7 การปรับเทียบและตรวจสอบยืนยันแบบจำลอง (Model Calibration and Verification)	90
5.7.1 การไหลในสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	90
5.7.2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม	94
5.8 ผลการจำลอง	96
5.8.1 การไหลในสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	96
5.8.2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม	96
5.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Sensitivity Analysis)	101
5.9.1 การไหลในสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	101
5.9.2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม	101
5.10 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล (Groundwater Potential Assessment)	102
5.10.1 กรณีที่ 1 การใช้น้ำคงที่ในช่วงเวลา 20 ปี	103
5.10.2 กรณีที่ 2 การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วงเวลา 20 ปี	106
5.10.3 กรณีที่ 3 การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ในช่วงเวลา 20 ปี	110
5.11 เขตน้ำบาดาลย่อย (Zone Budget)	116
5.12 ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย (Safe Yield)	117
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุป	119
6.1.1 สภาพอุทกธรณีวิทยาของแอ่งหาคใหญ่	119
6.1.2 การไหลและสมดุลของน้ำใต้ดิน	120
6.1.3 การรुक้ำของน้ำเค็ม	121
6.1.4 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล	121
6.2 ข้อเสนอแนะ	122
บรรณานุกรม	124

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	128
ก ข้อมูลเกี่ยวกับบ่อสังเกตการณ์	129
ข ข้อมูลทางด้านอุทกวิทยา	133
ค ผลการสูบทดสอบ (Pumping Test) ในสนาม	145
ง ผลการตรวจวัดระดับน้ำในสนามและผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำในห้องปฏิบัติการ	156
จ ผลการทำ GPS Survey ในสนาม	171
ฉ ข้อมูลการใช้น้ำบาดาล	177
ช ที่มาและรายละเอียดสมการการไหลและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน	178
ซ การคำนวณหาปริมาณการเติมน้ำ	196
การเผยแพร่วิทยานิพนธ์	199
การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ ก	200
การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ ข	207
ประวัติผู้เขียน	215

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 จำนวนสถานีวัดน้ำฝนและค่าพิสัยของปริมาณฝนรายปีเฉลี่ย	7
2.2 ปริมาณการใช้น้ำของพืชและการระเหยสู่บรรยากาศพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา	8
2.3 ช่วงค่าการกักเก็บจำเพาะของชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน	20
2.4 ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน	21
2.5 ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของหินอุ้มน้ำ	22
3.1 รายละเอียดการรวบรวมข้อมูลทุกภูมิภาค	44
3.2 รายละเอียดของแนวตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา (Cross Section)	46
3.3 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่คิดอัตราส่วนของพื้นที่รับน้ำต่อพื้นที่ทั้งหมดโดยวิธีไทเซน	56
3.4 ปริมาณการคายระเหยเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2524-2544	56
3.5 ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2510-2549	57
3.6 ผลการคำนวณการเติมน้ำในพื้นที่ศึกษา	58
3.7 การใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา	59
4.1 รายละเอียดค่าพิกัดและระดับบ่อบาดาลด้วยกล้อง GPS System 500	63
4.2 สรุปคุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำหาคใหญ่	69
4.3 สรุปคุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำคูเต่า	71
4.4 สรุปคุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำคองหงส์	73
4.5 ผลวิเคราะห์การสูบทดสอบแบบบ่อเดี่ยว (Single well)	75
5.1 การกำหนดรายละเอียดของแบบจำลอง	83
5.2 รายละเอียดการกำหนดขอบเขตแบบจำลอง (Boundary Condition)	84
5.3 ปริมาณการเพิ่มเติมน้ำการจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	87
5.4 พารามิเตอร์ของชั้นน้ำที่ได้จากการปรับเทียบ (Calibrated parameters)	87
5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำจากการปรับเทียบ	89
5.6 ผลการปรับเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	91
5.7 ผลการปรับเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม	94
5.8 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปีจากการจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (พ.ศ.2550)	99

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.9 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่ 1 มีการใช้น้ำคงที่ ณ เวลา 20 ปี	106
5.10 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่ 2 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ณ เวลา 20 ปี	110
5.11 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่ 3 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ณ เวลา 20 ปี	114
5.12 สมดุลน้ำบาดาลแบ่งย่อยตามประเภทชั้นหินอุ้มน้ำในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบัน	116
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับระยะน้ำลด	117

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาบริเวณแอ่งหาคใหญ่	5
2.2 การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษา	10
2.3 ลักษณะรอยเลื่อนแบบ Horst and Graben	11
2.4 แผนที่ธรณีวิทยาของแอ่งหาคใหญ่	13
2.5 แผนที่อุทกธรณีวิทยาของแอ่งหาคใหญ่	15
2.6 รูปตัดขวางแสดงประเภทของชั้นหินอุ้มน้ำ	19
2.7 Zone of dispersion	24
2.8 Ghyben-Herzberg Relation	24
2.9 ลักษณะการเกิด Drawdown cone	25
2.10 แผนภาพแสดงการทดลองของคาร์ซี	26
2.11 แผนภาพแสดงระบบการไหลของน้ำใต้ดิน	29
2.12 แผนภาพแสดงลักษณะการไหลและระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่รับน้ำ พื้นที่ปันน้ำและพื้นที่สูญเสียน้ำ	29
2.13 การแพร่กระจายเชิงอุทกพลศาสตร์	30
2.14 ลักษณะการแบ่งพื้นที่ในการคำนวณ โดยวิธี Finite difference ใน MODFLOW	35
2.15 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม SEAWAT ใน MODFLOW	36
3.1 แนวตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา	47
3.2 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนว A-A'	48
3.3 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนว B-B'	49
3.4 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนว C-C'	51
3.5 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนว D-D'	52
3.6 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนว E-E'	54
3.7 แผนที่แสดงพื้นที่รับน้ำฝนที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีโทเสน	55
4.1 แผนที่แสดงตำแหน่งบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษา	61
4.2 แผนที่แสดงหมุดควบคุมในการสำรวจค่าระดับบ่อบาดาลด้วยกล้อง GPS System 500	62
4.3 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ (ซ้าย) อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำบาดาล (ขวา)	65
4.4 การตรวจวัดระดับน้ำในสนาม (ซ้าย) การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในสนาม (ขวา)	65

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำบาดาลใหญ่, (พฤษภาคม 2551)	66
4.6 ระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำคูเต่า, (พฤษภาคม 2551)	67
4.7 ระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำคองหงส์, (พฤษภาคม 2551)	68
4.8 ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ (ชั้นน้ำบาดาลใหญ่, พฤษภาคม 2551)	70
4.9 ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ (ชั้นน้ำคูเต่า, พฤษภาคม 2551)	72
4.10 ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ (ชั้นน้ำคองหงส์, พฤษภาคม 2551)	74
5.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	76
5.2 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของแอ่งหาคใหญ่	78
5.3 กรณีจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของน้ำเค็ม	80
5.4 การออกแบบกริดแบบจำลอง	82
5.5 อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิสู่แหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา	86
5.6 ตำแหน่งบ่อบาดาลและขอบเขตของแบบจำลอง (a) บ่อบาดาลและบ่อสังเกตการณ์ (b) การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง	88
5.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (a) ปีที่ 6 (พ.ศ.2550) (b) ปีที่ 7 (พ.ศ.2551)	91
5.8 เปรียบเทียบระดับน้ำที่วัดได้ในสนามกับค่าที่คำนวณจากแบบจำลอง (พ.ศ.2545-2551)	92
5.9 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีความหนาแน่นของน้ำคองที่ (a) ปีที่ 6 (พ.ศ.2550) (b) ปีที่ 7 (พ.ศ.2551)	95
5.10 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คองที่ (a) ปีที่ 6 (พ.ศ.2550) (b) ปีที่ 7 (พ.ศ.2551)	95
5.11 ผลการจำลองแสดงทิศทางการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (ปีที่ 6, พ.ศ.2550) (a) ชั้นน้ำบาดาลใหญ่ (b) ชั้นน้ำคูเต่า (c) ชั้นน้ำคองหงส์	97
5.12 ภาพตัดขวางแสดงทิศทางการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ปีที่ 6 (พ.ศ.2550)	98
5.13 ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มในสภาวะการใช้น้ำในปัจจุบัน (พ.ศ.2550)	100
5.14 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา	101
5.15 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม	102

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่ 1 มีการใช้น้ำคงที่ ในช่วงเวลา 20 ปี	104
5.17 ระดับน้ำลด (Drawdown) กรณีที่ 1 มีการใช้น้ำคงที่ ในช่วงเวลา 20 ปี (พ.ศ. 2550-2569)	105
5.18 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่ 1 มีการใช้น้ำคงที่ ในช่วงเวลา 20 ปี (พ.ศ.2550-2569)	107
5.19 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่ 2 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วงเวลา 20 ปี	108
5.20 ระดับน้ำลด (Drawdown) กรณีที่ 2 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วงเวลา 20 ปี	109
5.21 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่ 2 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในช่วงเวลา 20 ปี	111
5.22 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่ 3 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ในช่วงเวลา 20 ปี	112
5.23 ระดับน้ำลด (Drawdown) กรณีที่ 3 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ในช่วงเวลา 20 ปี	113
5.24 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่ 3 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 20 ปี	115
5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับระยะน้ำลด	117

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

การพัฒนาป่าบาดาลมาใช้ โดยทั่วไปมีจุดประสงค์หลักเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมากที่สุด แต่การสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณมาก ๆ อาจทำให้ความสมดุลระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและสูบน้ำออกจากชั้นน้ำเสียไป ดังนั้นการบริหารจัดการการสูบน้ำที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ระดับน้ำที่กักเก็บในชั้นน้ำลดลงและปริมาณน้ำเสียสมดุล ส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เช่นการลดลงของระดับน้ำ การทรุดตัวของแผ่นดินและการรุกคืบของน้ำเค็ม เป็นต้น

เทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลาเป็นเมืองศูนย์กลางทางธุรกิจ ท่องเที่ยว และการศึกษาของภาคใต้ตอนล่าง ความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและการขยายตัวของชุมชนเมืองในบริเวณอำเภอหาดใหญ่และพื้นที่รอบๆ ทำให้ปริมาณการใช้น้ำมากขึ้นทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการใช้ภายในครัวเรือน ในสิบห้าปีที่ผ่านมาป่าบาดาลซึ่งถูกสูบน้ำมาใช้อย่างมากมายทำให้ระดับน้ำใต้ดินลดลง ทำให้มีน้ำจากแหล่งน้ำในบริเวณรอบๆ ไหลมาเติม เช่นน้ำจากเทือกเขาบรรทัดในทิศตะวันตก น้ำจากเขาคอหงส์ในทิศตะวันออก ซึ่งอาจรวมถึงน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาด้วย ซึ่งปรากฏการณ์นี้ได้มีการตรวจพบว่าน้ำจากป่าบาดาลบริเวณรอบๆทะเลสาบสงขลามีความกร่อยโดยมีปริมาณคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐาน โดย กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2546) ศึกษาสมดุลของแหล่งน้ำบาดาลในแอ่งหาดใหญ่พบว่า พื้นที่ศึกษามีอัตราการสูบน้ำประมาณ 12 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สมดุลน้ำบาดาลประมาณ 260 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และ อมรรรัตน์ (2548) ศึกษาการไหลของน้ำบาดาลในแอ่งหาดใหญ่พบว่า มีการไหลจากทิศตะวันตก ตะวันออกและทิศใต้ลงสู่ที่ราบตอนกลางของแอ่งบริเวณอำเภอหาดใหญ่ แล้วไหลไปทางทิศเหนือลงสู่ทะเลสาบสงขลา อย่างไรก็ตาม การศึกษาปริมาณการสูบน้ำที่เหมาะสมและการรุกคืบของน้ำเค็มสู่ชั้นน้ำใต้ดินอย่างมีระบบ และสามารถนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์สูงสุดนั้นยังไม่มี จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาหาปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่เหมาะสม (Safe yield) ที่ไม่ก่อให้เกิดการรุกคืบของน้ำเค็มและไม่เกิดการลดลงของระดับน้ำอย่างมีนัยสำคัญ

การศึกษาในครั้งนี้ต้องการศึกษาศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล และความเป็นไปได้ของการรุกคืบของน้ำเค็มในแอ่งหาดใหญ่ในปัจจุบันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการจำลองการ

ไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของมวลสาร (Groundwater flow and solute transport modeling) โดยใช้โปรแกรม MODFLOW, MT3DMS และ SEAWAT ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปใช้คาดการณ์การรुक้าของน้ำเค็มในอนาคต นอกจากนี้ยังสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปใช้ในการบริหารจัดการการใช้น้ำบาดาลในบริเวณพื้นที่บริเวณรอบๆทะเลสาบสงขลาอย่างยั่งยืนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 ศึกษาสภาพทางธรณีและอุทกธรณีของชั้นน้ำในแอ่งหาดใหญ่
- 1.2.2 ศึกษาการไหลและสมดุลของน้ำใต้ดินในแอ่งหาดใหญ่
- 1.2.3 ศึกษารูปแบบและขอบเขตของการรุกของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทยสู่ชั้นน้ำใต้ดิน
- 1.2.4 สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์จำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการรุกของน้ำเค็มโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ให้ความหนาแน่นของมวลสารแปรผันได้ (Variable density) เพื่อนำไปใช้ในการคาดคะเนการรุกของน้ำเค็มสู่ชั้นน้ำใต้ดินในอนาคตเมื่อมีการใช้น้ำในปริมาณที่มากขึ้นและประเมินปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่เหมาะสม (Safe yield) ของชั้นน้ำหาดใหญ่

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษาครั้งนี้จะศึกษาเฉพาะพื้นที่ที่เป็นชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนหินร่วน (Unconsolidated aquifers) ของแอ่งหาดใหญ่ ครอบคลุมพื้นที่ 5 อำเภอของจังหวัดสงขลา ประกอบด้วย อำเภอลองหอยโข่ง อำเภอหาดใหญ่ อำเภอบางกล่ำ อำเภควนเนียงและอำเภอสิงหนคร ส่วนความเค็มของน้ำจะศึกษาในรูปแบบของคลอไรด์และการประเมินศักยภาพน้ำบาดาลศึกษาเฉพาะชั้นน้ำหาดใหญ่เท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 ทราบถึงกลไกและขอบเขตการรุกของน้ำเค็มในแอ่งหาดใหญ่ในสถานะการใช้น้ำในปัจจุบันและอนาคต

1.4.2 สามารถกำหนดปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่เหมาะสม (Safe yield) ในชั้นน้ำบาดาลใหญ่ที่จะไม่ทำให้เกิดการรุกของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาสู่ชั้นน้ำใต้ดินขยายวงกว้างมากขึ้น เพื่อการบริหารจัดการน้ำใต้ดินทั้งทางด้านปริมาณและคุณภาพอย่างยั่งยืนต่อไป

บทที่ 2

บททวนเอกสาร

การศึกษาการไหลของน้ำใต้ดินและการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนของแอ่งหาคใหญ่ จำเป็นจะต้องเข้าใจถึงสภาพพื้นที่ศึกษา ระบบการไหลและกระบวนการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินรวมทั้งการเลือกใช้แบบจำลองที่จะนำมาประยุกต์ใช้ให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทั้งหมดโดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ 1) ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา 2) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับน้ำบาดาลและสารปนเปื้อน 3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ 4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

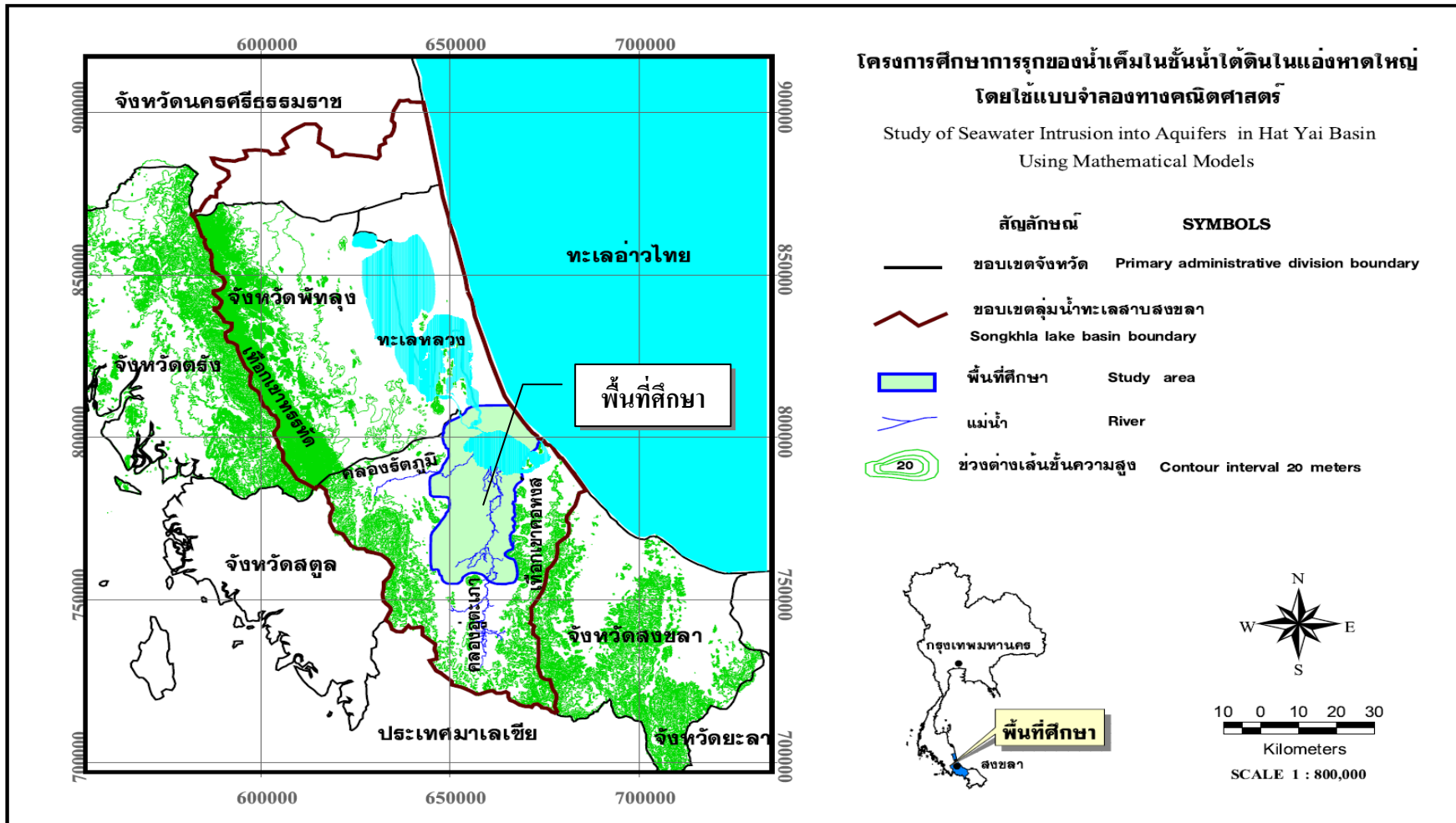
2.1 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

2.1.1 ที่ตั้งและขอบเขต

แอ่งหาคใหญ่เป็นแอ่งน้ำบาดาลขนาดย่อมทางตอนล่างของกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา อยู่บนพื้นที่ราบชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกของภาคใต้ ตั้งอยู่ระหว่างพิกัด UTM 640000-670000E UTM 750000-810000N วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ มีความยาว 60 กิโลเมตรความกว้างประมาณ 20 กิโลเมตร และมีความลึกมากที่สุด 1 กิโลเมตร คิดเป็นพื้นที่ประมาณ 1,200 ตารางกิโลเมตร (Lohawijam, 2005) ครอบคลุมพื้นที่ อ.หาคใหญ่ อ.บางกล่ำ อ.ควนเนียง อ.คลองหอยโข่งและอ.สิงหนคร จ.สงขลา แสดงดังรูปที่ 2.1 ทั้งนี้ขอบเขตทางตะวันตก-ตะวันออกอยู่ประมาณพิกัด UTM 640000-670000E แต่ขอบเขตแอ่งหาคใหญ่ตามแนวเหนือ-ใต้นั้น ยังเป็นข้อถกเถียงกันทางวิชาการ โดยสรุปได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1) ขอบเขตแอ่งตามทิศทางเหนือ-ใต้ สิ้นสุดที่เขาวังชิง

ผลงานวิจัยของ Lohawijam (2005) โดยวิธีสนามโน้มถ่วง (Gravity) พบว่า แอ่งหาคใหญ่มีความยาวจำกัดในแนวเหนือ-ใต้ อยู่ระหว่างพิกัด UTM 750000-810000N โดยเริ่มจากบริเวณอำเภอสิงหนครจนถึงเขาวังชิงอำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา การวางตัวของแอ่งหาคใหญ่ไม่ได้วางตัวตรงในแนวเหนือ-ใต้ เสียทีเดียวเนื่องจากขอบเขตแอ่งด้านทิศเหนือ-ใต้มีทิศ



รูปที่ 2.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาบริเวณแอ่งหาดใหญ่

ทางโค้งไปทางทิศตะวันออก

2) ขอบเขตแอ่งตามทิศทางเหนือ-ใต้ ที่สิ้นสุดที่ชายแดนไทย-มาเลเซีย

ผลงานวิจัยของ Sawata et al. (1983) พิจารณารอยเลื่อน Horst and garben เป็นหลัก สรุปไว้ว่าอยู่ระหว่างพิกัด UTM 720000-810000N นั่นคือขอบเขตแอ่งทางทิศเหนือน่าจะชนอ่าวไทย ส่วนทางทิศใต้ต่อเนื่องไปจนถึง ชายแดนไทย-มาเลเซีย โดยแอ่งมีความลึกในบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่มากกว่า 200 เมตร

2.1.2 สภาพภูมิประเทศ

ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปของแอ่งหาดใหญ่ เป็นที่ราบล้อมรอบด้วยภูเขาและพื้นที่ซึ่งเป็นที่เนินถึง 3 ด้าน คือเทือกเขาทางทิศตะวันตกถึงเทือกเขาบรรทัด ทางด้านทิศใต้คือเทือกเขาสันกาลาคีรี ซึ่งเป็นชายแดนไทย-มาเลเซีย ส่วนด้านทิศเหนือติดต่อกับทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย บริเวณกลางแอ่งเป็นที่ราบมีความสูงเฉลี่ยประมาณ 9 เมตร เหนือระดับทะเลปานกลาง ยอดเขาสูงที่สุดในบริเวณนี้คือ เขาคอหงส์ ซึ่งอยู่ทางด้านตะวันออกของแอ่งหาดใหญ่ และห่างจากตัวเมืองหาดใหญ่ประมาณ 6 กิโลเมตร มีความสูง 371 เมตร เหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง (สภา, 2539)

2.1.3 สภาพภูมิอากาศ

แอ่งหาดใหญ่ตั้งอยู่ตอนล่างของทะเลสาบสงขลาซึ่งอยู่ทางภาคใต้ฝั่งตะวันออกทำให้ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมที่สำคัญ 2 ช่วง คือลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ มีลักษณะภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน (Tropical monsoon climates) กล่าวคือ มีอากาศร้อนและมีฝนตกชุกเกือบตลอดปีและมีเพียง 2 ฤดู คือ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546)

1) ฤดูฝน เริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนธันวาคม แบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงกันยายน ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดผ่านมหาสมุทรอินเดีย ช่วงนี้จะมีฝนตกน้อย ช่วงที่สองตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงธันวาคม ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุม

ตะวันออกเฉียงเหนือพัดผ่านทะเลอ่าวไทย ช่วงนี้ฝนจะตกชุกโดยในเดือนพฤศจิกายนจะเป็นเดือนที่ฝนตกมากที่สุด

2) ฤดูร้อนเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเมษายนได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งเป็นลมร้อนและชื้น โดยในเดือนเมษายนจะมีอากาศร้อนมากที่สุด

2.1.4 สภาพอุทกวิทยา

เนื่องจากแอ่งหาคใหญ่เป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา ดังนั้นข้อมูลทางอุทกวิทยาจึงสามารถใช้จากพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาได้ ซึ่งประกอบด้วย

1) ปริมาณฝน

ปริมาณฝนในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา จากข้อมูลสถานีวัดน้ำฝน 47 สถานีซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาจากหน่วยงานต่างๆ ได้แก่ กรมอุตุนิยมวิทยาและกรมชลประทาน พบว่า ปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีของแต่ละจังหวัด (ข้อมูลเฉลี่ย 30 ปี ช่วงปี พ.ศ.2516-2545) มีค่าพิสัยดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จำนวนสถานีวัดน้ำฝนและค่าพิสัยของปริมาณฝนรายปีเฉลี่ย

จังหวัด	จำนวนสถานีวัดน้ำฝน	ค่าพิสัยของปริมาณฝนรายปีเฉลี่ย (มม.)
พัทลุง	14	1,407 – 2,660
สงขลา	25	1,437 – 2,189
นครศรีธรรมราช	8	1,452 – 2,193

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา, (2546)

2) การคายระเหย

การคายระเหยคิดจากปริมาณการใช้ น้ำของพืชและการระเหยสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูญเสียดังกล่าวจากพื้นดินสู่บรรยากาศ พิจารณาตามการใช้ประโยชน์ที่ดินแบ่งเป็น

พื้นที่อยู่อาศัย พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่แหล่งน้ำและพื้นที่ป่าไม้ พบว่าพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลามีปริมาณการใช้น้ำของพืชและการระเหยสู่บรรยากาศรวม 4,642 มิลลิเมตร/ปี ดังแสดงในตารางที่ 2.2 (ประมาณจากผลการศึกษาข้อมูลการเกษตรปี พ.ศ.2535 และ 2540 รวมกับภาพถ่ายดาวเทียมปี พ.ศ. 2539 และ 2543)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการใช้น้ำของพืชและการระเหยสู่บรรยากาศพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา

สภาพการใช้ที่ดิน	พื้นที่ (ตร.กม.)	การระเหยเฉลี่ย (มม./ปี)
1. พื้นที่อยู่อาศัย	192	0
2. พื้นที่เกษตรกรรม		
- นาข้าว (การใช้น้ำของข้าว)	1,795	875
- นาข้าว (การระเหยจากการขังน้ำ)	1,795	1,060
- ไม้ผล + ไม้ยืนต้น	3,447	2,563
- นาเกลือ (การระเหยจากการขังน้ำ)	56	89
3. พื้นที่แหล่งน้ำ		
- ทะเลสาบ & พรุ	1,040	-
- สระน้ำ แอ่งน้ำ ฯลฯ	23	37
- แหล่งที่สร้าง	11	18
4. พื้นที่ป่าไม้ & อื่นๆ	1,931	0
รวม	8,495	4,626

ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546

3) แหล่งน้ำผิวดิน

แหล่งน้ำผิวดินที่สำคัญของแอ่งหาดใหญ่ คือ คลองอู่ตะเภา ซึ่งอยู่บริเวณกลางพื้นที่ศึกษา ต้นน้ำเกิดจากเทือกเขาสันกาลาคีรี ในตำบลสำนักแก้ว อำเภอสะเดา ไหลผ่านตำบลต่างๆ ในอำเภอสะเดา เข้าสู่อำเภอหาดใหญ่ ผ่านตำบลพะตง ทุ่งลาน บ้านพรุ ควนดั่ง คลองอู่ตะเภา คลองแห บ้านหาร และไหลลงสู่ทะเลสาบสงขลาที่บ้านคลองบางกล้า อำเภอบางกล่ำ มีความยาวประมาณ 90 กิโลเมตร (ข้อมูลจังหวัดสงขลา, 2545) คลองอู่ตะเภามีความกว้างเฉลี่ยประมาณ 50 เมตร และลึกประมาณ 3.5 เมตร (ราม และคณะ, 2544)

นอกจากนี้บริเวณตอนเหนือของพื้นที่ศึกษายังมี คลองรัตภูมิ ซึ่งมีต้นน้ำจาก เทือกเขาบรรทัดและเขาหลวง ไหลผ่านอำเภอรัตภูมิ อำเภอกวนเนียง ลงสู่ทะเลสาบสงขลาที่บ้าน ปากบาง อำเภอกวนเนียง มีความยาวประมาณ 63 กิโลเมตร (ข้อมูลจังหวัดสงขลา, 2545)

4) ปริมาณน้ำท่า

ผลการประเมินน้ำท่าแต่ละลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา ของกรมชลประทาน ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำ 7,455 ตารางกิโลเมตร (ไม่รวมพื้นที่ทะเลสาบ) แสดงปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด 21 สถานี สามารถสรุปได้ว่าปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 4,907 ล้านลูกบาศก์เมตร (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546)

2.1.5 การใช้ประโยชน์ที่ดิน

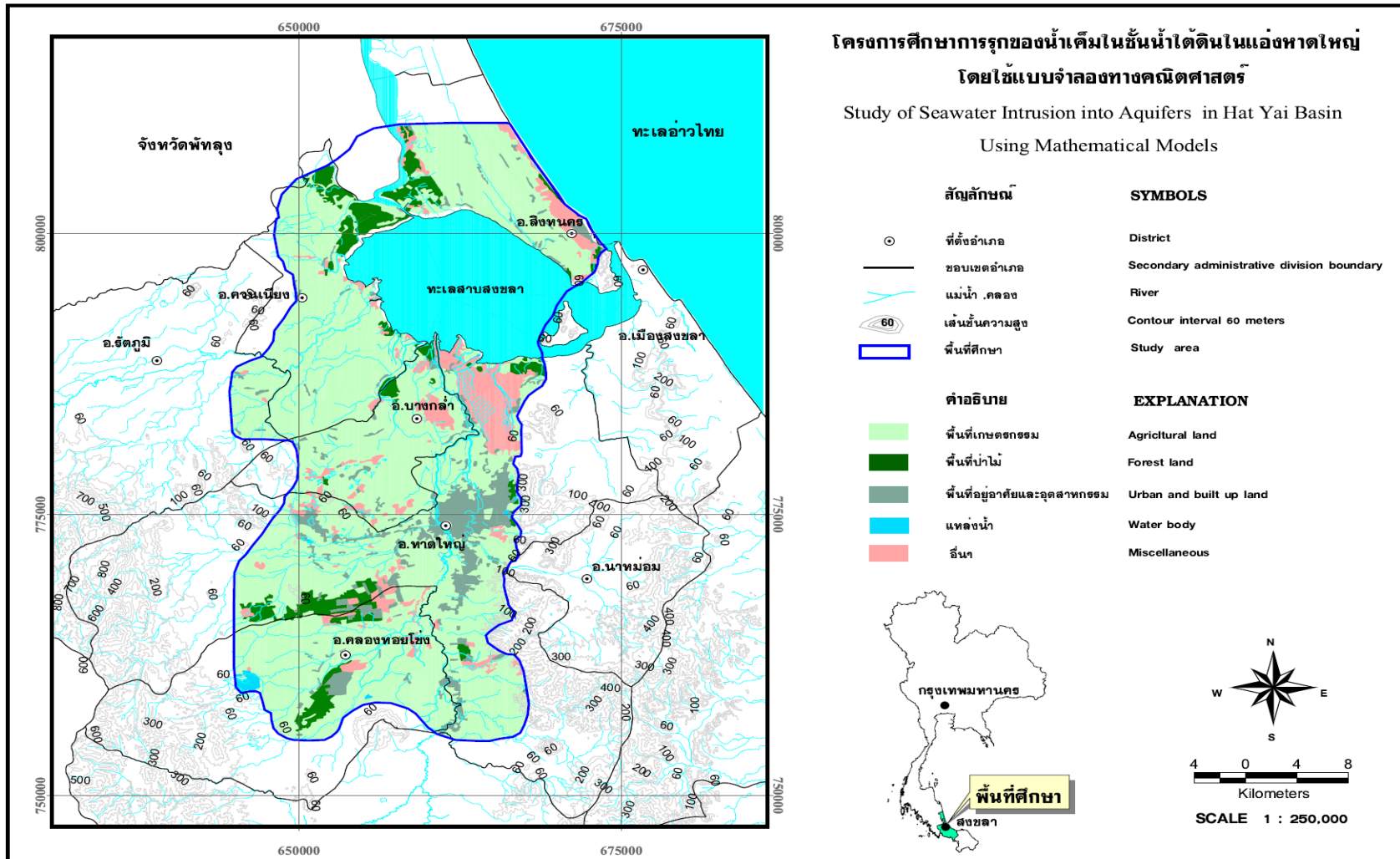
ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่ศึกษาจากกรมพัฒนาที่ดิน ปี พ.ศ. 2543 พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกยางพารา การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษา แบ่งออกเป็น 5 ประเภท (รูปที่ 2.2) ครอบคลุมพื้นที่ 1,110 ตารางกิโลเมตร ซึ่งประกอบด้วย

1) พื้นที่เกษตรกรรม ได้แก่ นาดีนาหวาน ไม้ยืนต้น ยางพารา ปาล์มน้ำมัน ไม้ผล ผสม โรงเรือนเลี้ยงสัตว์ และสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เป็นต้น พบกระจายตัวอยู่ทั่วไปตั้งแต่บริเวณที่ราบลุ่มตอนกลางของพื้นที่ศึกษา ครอบคลุมพื้นที่ 890 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 80.17% ของพื้นที่ศึกษา

2) พื้นที่ป่าไม้ บริเวณเนินเขาทางด้านทิศตะวันตกและทิศตะวันออกของพื้นที่ศึกษา จะเป็น ป่าไม้ดิบชื้น ป่าดิบแล้ง ป่าเบญจพรรณหรือป่าพรุ ป่าชายเลน และสวนป่าผสม ครอบคลุมพื้นที่ 61 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 5.16% ของพื้นที่ศึกษา

3) พื้นที่ที่อยู่อาศัยและอุตสาหกรรม ได้แก่ หมู่บ้าน ตัวเมืองย่านการค้า โครงการที่ดินจัดสรร และโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น พบกระจายตัวอยู่ทั่วไปตั้งแต่บริเวณที่ราบลุ่มตอนของพื้นที่ศึกษา ครอบคลุมพื้นที่ 71 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 6.36% ของพื้นที่ศึกษา

4) พื้นที่แหล่งน้ำ ได้แก่ อ่างเก็บน้ำคลองหลาและอ่างเก็บน้ำคลองจำไทร ทางทิศตะวันตก และอ่างเก็บน้ำคลองสะเดา ทางทิศใต้ของพื้นที่ศึกษา และแม่น้ำลำคลองบริเวณตอนกลาง



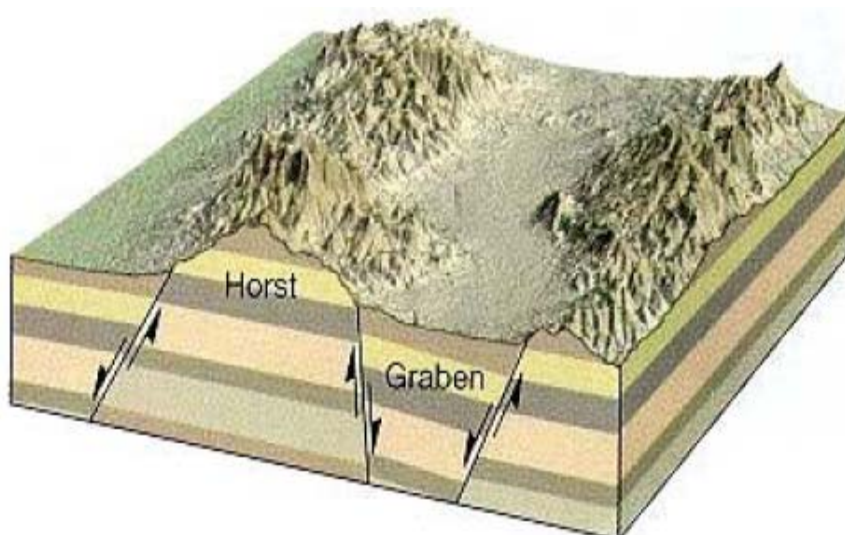
รูปที่ 2.2 การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษา

ของพื้นที่ศึกษา ครอบคลุมพื้นที่ 9 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 0.78% ของพื้นที่ศึกษา

5) พื้นที่อื่นๆ ส่วนใหญ่จะเป็นพรุ พื้นที่ลุ่ม ทุ่งหญ้า เหมือนเก่า ที่ทิ้งขยะ และสุสานป่าช้า ส่วนใหญ่อยู่ตอนกลางและทางทิศเหนือของพื้นที่ศึกษา คิดกับทะเลสาบสงขลาตอนล่าง ครอบคลุมพื้นที่ 80 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 7.22% ของพื้นที่ศึกษา

2.1.6 ธรณีสัณฐานและธรณีโครงสร้าง

แอ่งหาคใหญ่เป็นแอ่งเทอร์เชียรี (Tertiary) ลักษณะเป็นแอ่งที่ราบระหว่างหุบเขา (Intermountain Groundwater Basin) มีตะกอนในยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) ปกคลุมอยู่ด้านบน ขอบแอ่งด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกเป็นเทือกเขาสูงซึ่งเป็นหินทรายหินดินดาน และหินเชิร์ต ยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous) และหินแกรนิต เนื่องจากแอ่งหาคใหญ่เกิดจากการเคลื่อนไหวของเปลือกโลกทำให้เกิดแนวรอยเลื่อนโดยบริเวณขอบแอ่งทั้งสองด้านถูกยกตัวขึ้นมา ในลักษณะ Horst and graben (รูปที่ 2.3) ทำให้ขอบแอ่งมีตะกอนกรวดขนาดใหญ่ที่เกิดจากการผุพังของหินบริเวณขอบแอ่งตกตะกอนทับถมอยู่เป็นจำนวนมาก ตะกอนเหล่านี้ประกอบด้วยกรวดขนาดเล็กถึงใหญ่มาก มีความกลมมนปานกลาง และส่วนละเอียด (Very poorly graded) ส่วนบริเวณกลางแอ่งมีการสะสมตัวของตะกอนกรวดทรายและดินเหนียว ที่เกิดจากการพัดพาของแม่น้ำสมัยโบราณและแม่น้ำสายปัจจุบัน



รูปที่ 2.3 ลักษณะรอยเลื่อนแบบ Horst and Graben

ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยาจากคู่มือการใช้แผนที่น้ำบาดาล (กรมทรัพยากรธรณี, 2544 ปัจจุบันกรมทรัพยากรน้ำบาดาล) สรุปได้ว่า ในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาประกอบไปด้วย ชั้นหินที่มีอายุแตกต่างกันเรียงตามลำดับจากอายุมากไปหาอายุน้อย (รูปที่ 2.4) ได้แก่

1) หินยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous)

หินยุคคาร์บอนิเฟอรัสเป็นหินที่มีอายุอยู่ในช่วง 360 – 286 ล้านปี ประกอบไปด้วย หินทราย หินดินดาน หินทรายแป้ง หินเชิร์ต หินโคลน หินทรายปนกรวด บริเวณที่สัมผัสกับ หินแกรนิตจะถูกกระบวนการแปรสภาพสัมผัส (Contact metamorphism) เปลี่ยนไปเป็นหินควอร์ตไซต์ หินฟิลไลต์ หินควอตซ์ชีสต์ และหินชีสต์ พบทั่วไปทั้งทางด้านตะวันออกและตะวันตกของพื้นที่ศึกษา

2) หินยุคเพอร์เมียน (Permian) หรือหินปูนชุกราชบุรี (Ratchaburi Limestone)

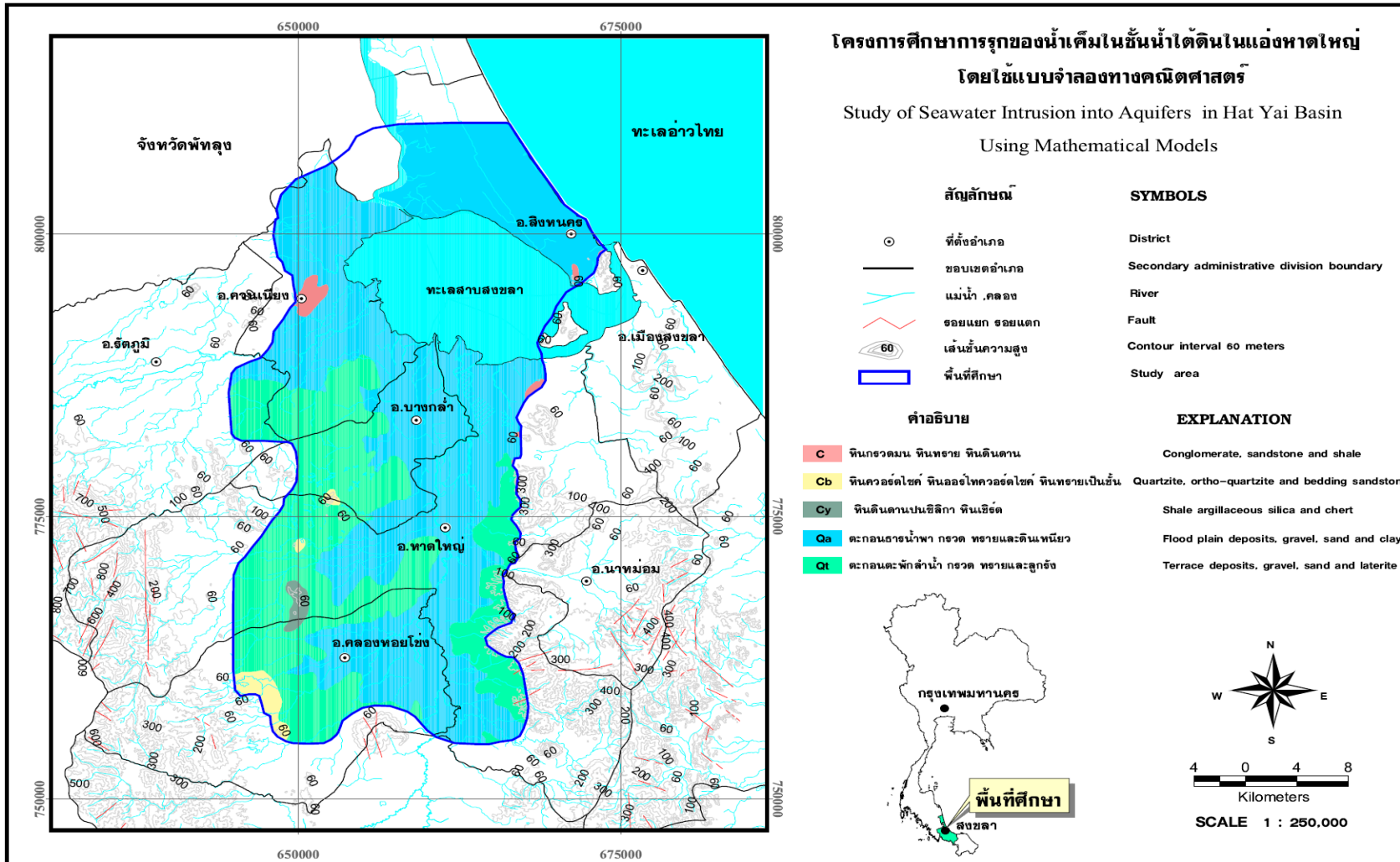
หินยุคเพอร์เมียนเป็นหินที่มีอายุอยู่ในช่วงประมาณ 286 – 245 ล้านปี ประกอบไปด้วยหินปูน และหินปูนเนื้อโคลโลไมต์ มีหินเชิร์ตเป็นกระเปาะและแทรกสลับเป็นชั้นบางๆ กระจายตัวเป็นบริเวณแคบๆ ทางด้านฝั่งตะวันตกของพื้นที่ศึกษา

3) หินยุคไทรแอสสิก – จูแรสสิก (Triassic – Jurassic)

หินยุคไทรแอสสิก – จูแรสสิกเป็นหินที่มีอายุอยู่ในช่วงประมาณ 245 – 140 ล้านปี ประกอบไปด้วยหินทราย หินทรายแป้ง หินดินดาน หินกรวดมน และหินปูน พบอยู่ทั่วไปทางตอนใต้ และทางตะวันออกของพื้นที่

4) หินยุคควอเทอร์นารี (Quaternary)

หินยุคควอเทอร์นารีได้แก่ชั้นของตะกอนที่มีอายุอยู่ในช่วง 140 ล้านปี – ปัจจุบัน ประกอบไปด้วยตะกอน กรวด ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว ลูกกรัง และเศษหินที่ถูกพัดพามาสะสมตัวกันโดยตัวกลางชนิดต่างๆ เช่น แม่น้ำ ทะเล และลม เป็นต้น พบทั่วไปบริเวณที่ราบระหว่างภูเขา ที่ราบลุ่มแม่น้ำและที่ราบชายฝั่งทะเลซึ่งเป็นพื้นที่หลักในการศึกษารังนี้ ตะกอนชุดนี้



รูปที่ 2.4 แผนที่ธรณีวิทยาของแอ่งหาดใหญ่

เป็นตะกอนที่ยังไม่มีการจับตัวและเชื่อมประสานเป็นหินแข็ง ยกเว้นในบางบริเวณที่อาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำบาดาลทำให้ตะกอนบางส่วนถูกเชื่อมประสานด้วยแร่เหล็กที่ถูกพัดพามากับน้ำบาดาลกลายเป็นชั้นลูกรังหรือศิลาแลง(Laterite) ความหนาของชั้นลูกรังขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลนั้นๆ ตะกอนยุคควอเทอร์นารีที่พบในพื้นที่ศึกษา ประกอบไปด้วย

4.1) ตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึง (Floodplain deposits) ได้แก่ ชั้นของตะกอน กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ที่ถูกพัดพามาสะสมตัวโดยทางน้ำในบริเวณที่ราบลุ่มน้ำหลาก ขนาดของ ตะกอนกรวดทรายเล็กกว่า 2 เซนติเมตร รูปร่างของเม็ดตะกอนมีเหลี่ยมคมเล็กน้อยถึงค่อนข้างกลมมน การคัดขนาดปานกลาง ประกอบไปด้วยแร่ควอตซ์ และเชิร์ต เป็นส่วนใหญ่

4.2) ตะกอนตะพักลำน้ำระดับสูง (High terrace deposits) เป็นชั้นของตะกอนกรวดขนาดใหญ่ ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว และลูกรัง ที่เกิดจากการพัดพามาสะสมโดยทางน้ำโบราณ ขนาดของกรวดมีตั้งแต่ 2 เซนติเมตร จนถึงใหญ่กว่า 1 เมตร มีความกลมมนปานกลางถึงกลมมนค่อนข้างสูง การคัดขนาดไม่ดี ประกอบไปด้วยแร่ควอตซ์ เชิร์ต ควอร์ตไซต์ ควอตซ์ซีสต์ หินทราย หินทรายแป้ง และแกรนิต โดยมากพบเป็นหินโผล่บริเวณของแอ่ง วางตัวอยู่ในระดับสูงกว่าระดับตะกอนทางน้ำปัจจุบัน และบางส่วนวางตัวอยู่ด้านล่างของตะกอนทางน้ำปัจจุบัน

2.1.7 ลักษณะอุทกธรณีวิทยา

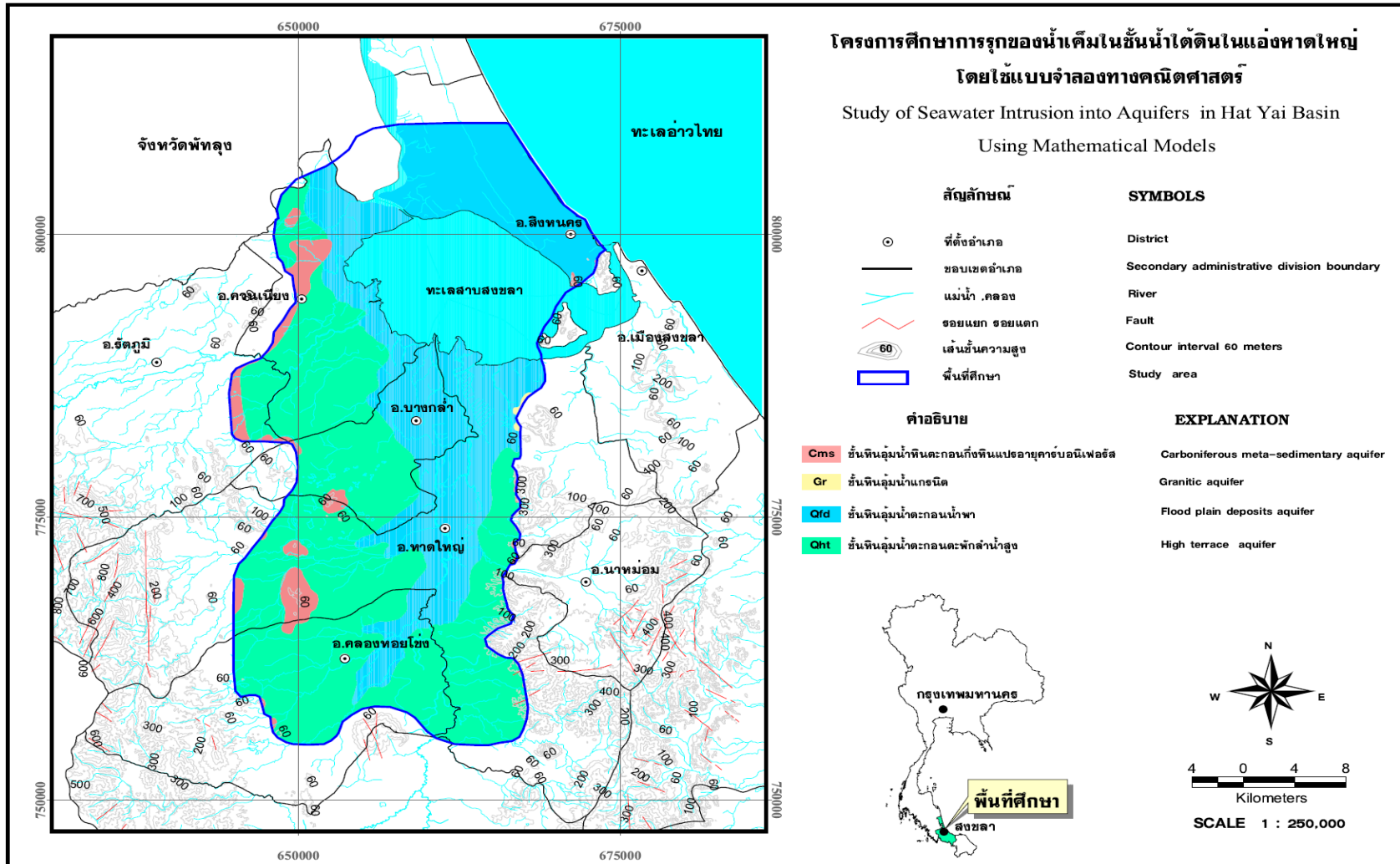
การศึกษาคู่มือการใช้แผนที่น้ำบาดาล (กรมทรัพยากรธรณี, 2544 ปัจจุบัน กรมทรัพยากรน้ำบาดาล) สรุปได้ว่า แหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาประกอบไปด้วยน้ำบาดาลที่ถูกกักเก็บอยู่ภายในตะกอนหินร่วนและชั้นหินแข็ง (รูปที่ 2.5) ซึ่งสามารถแบ่งย่อยรายละเอียดได้ดังนี้

1) ชั้นหินอุ้มน้ำในตะกอนหินร่วน (Unconsolidated Aquifer)

ชั้นตะกอนหินร่วนที่ยังไม่มีการจับตัวและเชื่อมประสานซึ่งเป็นแหล่งกักเก็บน้ำบาดาล ในแอ่งขนาดใหญ่ประกอบด้วย

1.1) ชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนน้ำพา (Fluvial Deposits Aquifer; *Qfd*)

ชั้นหินอุ้มน้ำประกอบด้วย กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว โดยน้ำบาดาลจะ



รูปที่ 2.5 แผนที่อุทกธรณีวิทยาของแอ่งหาดใหญ่

กักเก็บอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดกรวด ททราย ที่สะสมตัวอยู่ในที่ราบลุ่มน้ำหลาก บริเวณแนวคดโค้งของทางน้ำ และบริเวณที่ราบชายฝั่งทะเลที่เกิดจากการพัดพาของทางน้ำ โดยทั่วไปจะพัฒนาน้ำบาดาลได้ที่ระดับความลึก 30-60 เมตร ประมาณน้ำที่ได้อยู่ในเกณฑ์ 10-30 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง บางบริเวณคุณภาพน้ำกร่อย-เค็ม เนื่องจากการรุกคืบของน้ำทะเล ตะกอนชุดนี้วางตัวอยู่บนตะกอนทางน้ำเก่า

1.2) ชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนตะพักถ้ำน้ำสูง (High Terrace Aquifer; *Qht*)

ชั้นหินอุ้มน้ำประกอบด้วยชั้นของตะกอน กรวดขนาดใหญ่ ททราย ททรายแป้ง และดินเหนียว ที่เกิดจากการพัดพาโดยทางน้ำโบราณ ตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 2 เซนติเมตรจนถึงมากกว่า 1 เมตร มีความกลมมนปานกลางถึงค่อนข้างสูง การคัดขนาดไม่ดี ประกอบไปด้วย ควอตซ์ เซิร์ต ควอร์ตไซต์ ควอตซ์ซีสต์ หินทราย หินทรายแป้ง และแกรนิต พบบริเวณของแอ่งหาดใหญ่ บริเวณอำเภอคลองหอยโข่ง อำเภอสะเตาะปริมาณน้ำอยู่ในช่วง 2-10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือ 10-20 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คุณภาพน้ำดี ความลึกที่พัฒนาน้ำบาดาลอยู่ในช่วง 20-60 เมตร บางบริเวณอาจลึกถึง 100 เมตร

1.3) ชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนเศษหินเชิงเขา (Colluvium Aquifer; *Qcl*)

ชั้นหินอุ้มน้ำประเภทนี้ประกอบด้วย กรวด ททราย ททรายแป้ง ดินเหนียว และเศษหิน เป็นชั้นตะกอนหนาที่ไม่มีการคัดขนาดของเม็ดตะกอน น้ำบาดาลถูกกักเก็บอยู่ในช่องว่างระหว่างกรวด ททราย ททรายแป้ง และเศษหิน ความลึกของชั้นน้ำบาดาล 20-40 เมตร ปริมาณน้ำอยู่ในเกณฑ์ 2-10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คุณภาพน้ำดี พบทั่วไปในบริเวณเชิงเขาและที่ราบระหว่างภูเขา

2) ชั้นหินอุ้มน้ำในหินแข็ง (Consolidated Aquifer)

ชั้นหินอุ้มน้ำในหินแข็ง คือแหล่งน้ำบาดาลจะถูกกักอยู่ในชั้นหินตะกอน หินตะกอนกึ่งหินแปร หินแปร และหินอัคนี ละเอียดยของชั้นหินที่พบในพื้นที่ศึกษาประกอบด้วย

2.1) ชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนกึ่งหินแปร (Meta-sedimentary Aquifer) ได้แก่

2.1.1) ชั้นหินให้น้ำตะกอนกึ่งหินแปรยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous Meta-sedimentary Aquifer; *Cms*) ประกอบด้วย หินดินดาน หินทรายแป้ง หินทราย หินชนวน หินฟัลไลต์ และหินควอร์ตไซต์ น้ำบาดาลถูกกักเก็บอยู่ภายในรอยแตก แนวแตก รอยเลื่อน และบริเวณที่หินผุ พบที่ในเขตอำเภอควนเนียง อำเภอบางกล่ำ อำเภอรัตนบุรี อำเภอหาดใหญ่ อำเภอลงหอย โข่ง อำเภอนาหม่อม และอำเภอสะเดา

2.1.8 แหล่งน้ำบาดาลแอ่งหาดใหญ่

สภา (2539) ศึกษาลักษณะชั้นดินและหินรวมทั้งข้อมูลของหลุมเจาะน้ำบาดาลในบริเวณแอ่งหาดใหญ่ และเครื่องหยั่งธรณี สามารถแบ่งชั้นน้ำบาดาลออกได้เป็น 3 ชั้น คือ

1) ชั้นน้ำหาดใหญ่ (Hat Yai Aquifer)

ชั้นน้ำหาดใหญ่เป็นชั้นน้ำชั้นบนสุด มีความลึกประมาณ 20 - 50 เมตร มีความหนาของชั้นกรวดทรายเฉลี่ย 10-20 เมตร โดยความหนาแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ บริเวณตัวเมืองหาดใหญ่หนาประมาณ 20-40 เมตร ปกคลุมด้วยดินเหนียวหรือดินเหนียวปนทรายซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านได้เล็กน้อย ชั้นน้ำหาดใหญ่เป็นชั้นน้ำประเภทปราศจากแรงดัน (Unconfined aquifer) ถึงกึ่งภายใต้แรงดัน (Semi-confined aquifer) การเพิ่มเติมของน้ำในชั้นน้ำนี้ จะได้จากน้ำฝนซึ่งตกมาในพื้นที่รับน้ำของแอ่งหาดใหญ่โดยตรง ชั้นน้ำหาดใหญ่เป็นชั้นน้ำหลักของแอ่งหาดใหญ่ ให้ปริมาณน้ำอยู่ในเกณฑ์เฉลี่ย 20 - 50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เป็นชั้นน้ำที่มีการพัฒนาขึ้นมาใช้มากที่สุด โดยใช้ในบ้านเรือน โรงแรม โรงงานอุตสาหกรรมและอื่นๆ บ่อบาดาลบางบ่อที่เจาะในชั้นนี้สามารถให้น้ำได้ถึง 150-200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

2) ชั้นน้ำคูเต่า (Ku Tao Aquifer)

ชั้นน้ำคูเต่าเป็นชั้นน้ำที่อยู่ลึกลงไปประมาณ 60 - 100 เมตร โดยมีความหนาประมาณ 30 เมตร โดยมีดินเหนียวกั้นจากชั้นน้ำหาดใหญ่ เป็นชั้นน้ำที่มีแรงดัน (Confined aquifer) ประกอบด้วยชั้นกรวดทรายหลายชั้น (Multi-layer aquifer) และดินทรายปนดินเหนียวซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านได้ ชั้นน้ำนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้น้อยกว่าชั้นน้ำหาดใหญ่

3) ชั้นน้ำคองหงส์ (Kor Hong Aquifer)

ชั้นน้ำคองหงส์เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดลงไปจากชั้นน้ำคูเต่า โดยมีดินเหนียวปิดทับอยู่ข้างบน อยู่ลึกลงไปจากผิวดินมากกว่า 100 เมตร เป็นชั้นน้ำที่มีแรงดัน (Confined aquifer) ประกอบด้วยชั้นกรวดทราย มีการคัดขนาด และความกลมมนดี โดยทั่วไป บ่อบาดาลที่เจาะในชั้นน้ำนี้จะให้น้ำน้อยกว่าบ่อบาดาลที่เจาะในชั้นน้ำ 2 ชั้นที่กล่าวมาแล้ว โดยสามารถให้น้ำได้ประมาณ 10 - 50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และมีการใช้น้ำในชั้นนี้น้อยกว่าน้ำบาดาลชั้นอื่น การเพิ่มของน้ำในชั้นนี้ได้จากการรั่วซึมของน้ำจากชั้นที่อยู่เหนือขึ้นไปชั้นน้ำทั้งสามนี้แยกจากกันโดยมีชั้นดินเหนียวกั้น

2.1.9 ระดับน้ำและทิศทางการไหลของน้ำบาดาล

การไหลของน้ำบาดาลในแอ่งหาคใหญ่ ส่วนใหญ่มีการไหลจากทางทิศใต้ขึ้นสู่ทิศเหนือและทิศตะวันตกเฉียงเหนือในแนวอนเนื่อง จากมีคุณสมบัติการยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวอนเนื่องดีกว่าการไหลในแนวตั้ง (สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546) จากการติดตามวัดระดับน้ำจากบ่อบาดาลซึ่งเจาะในชั้นน้ำหาคใหญ่บริเวณตัวเมืองและใกล้เคียง จำนวน 103 บ่อ โดยฝ่ายอุทกธรณีวิทยา กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี (ปัจจุบัน กรมทรัพยากรน้ำบาดาล) ในปี พ.ศ. 2535 ถึง พ.ศ. 2538 พบว่าน้ำบาดาลรอบตัวเมืองหาคใหญ่จะไหลเข้าสู่ตัวเมืองหาคใหญ่ ซึ่งบริเวณที่ระดับน้ำบาดาลลึกมากที่สุดอยู่กลางเมือง โดยมีระดับน้ำบาดาลต่ำกว่าระดับทะเลปานกลาง (รทก.) ประมาณ 8 เมตร มีความยาวประมาณ 10 กิโลเมตร และกว้างประมาณ 5 กิโลเมตร และพบว่าระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างต่อเนื่องและแผ่ขยายออกไปรอบด้าน ถ้าหากการแผ่กว้างของขอบเขตที่มีระดับน้ำบาดาลต่ำกว่าระดับทะเลปานกลางมากกว่า 8 เมตร ขยายไปทางเหนือจนถึงบริเวณทะเลสาบสงขลา จะทำให้น้ำเค็มแทรกตัวเข้ามาในชั้นน้ำหาคใหญ่ได้ (สภา, 2539)

2.1.10 สัณยภาพน้ำบาดาลในแอ่งหาคใหญ่

จากข้อมูลทริเทียม (Tritium, ^3H) ในตัวอย่างน้ำฝนและน้ำบาดาลบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยคลองอู่ตะเภาบ่งชี้ว่า น้ำบาดาลในแอ่งหาคใหญ่มีต้นกำเนิดจากน้ำฝนที่ซึมผ่านเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาล มีทิศทางการไหลจากขอบเขาลงสู่ใจกลางแอ่งซึ่งอยู่ในเขตเทศบาลนครหาคใหญ่ ในฤดูฝน

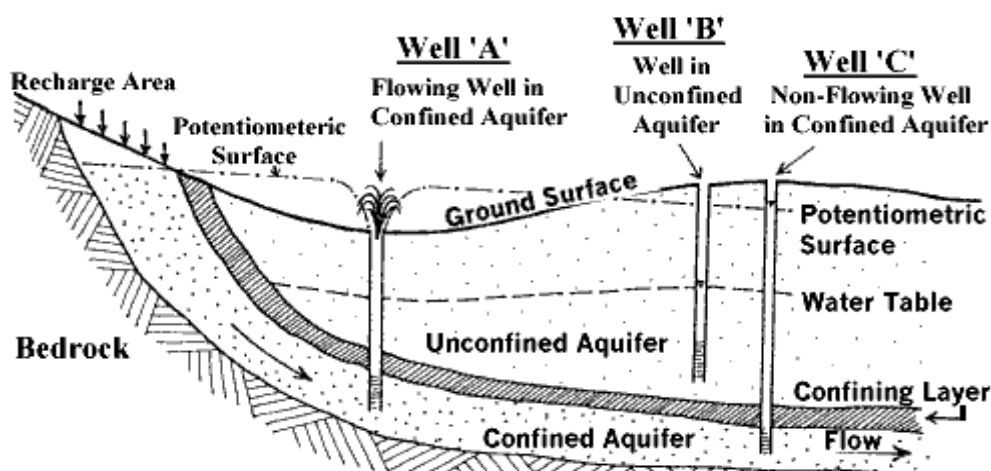
น้ำในคลองอุต๊ะเกาบางส่วนจะไหลเข้าไปเพิ่มเติมให้กับแหล่งน้ำบาดาลด้วย แต่ในช่วงฤดูแล้งจะกลับกันคือ น้ำบาดาลจะไหลออกสู่คลองอุต๊ะเกา และพบว่า 6% ของฝนที่ตกลงในพื้นที่จะไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในลุ่มน้ำย่อยคลองอุต๊ะเกา หรือประมาณ 120 มิลลิเมตรต่อปี (สุรพล, 2534)

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับน้ำบาดาลและสารปนเปื้อน

2.2.1 ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifers)

ชั้นหินอุ้มน้ำ หมายถึง ชั้นดินหรือหินที่มีน้ำแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือรอยแตกในชั้นหิน และสามารถให้น้ำในปริมาณมากพอที่จะสูบขึ้นมาใช้ได้ มีความสามารถในการกักเก็บน้ำและให้น้ำแตกต่างกันตามลักษณะการเกิดของชั้นหินอุ้มน้ำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดันและชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (รูปที่ 2.6)

1) ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined aquifers) เป็นชั้นให้น้ำที่ถูกปิดกั้นด้วยชั้นหินทึบน้ำ (Aquitard) ทั้งด้านบนและด้านล่าง ในธรรมชาติไม่มีชั้นทึบน้ำที่แท้จริง ชั้นหินทึบน้ำส่วนใหญ่จะยอมให้น้ำซึมผ่านได้ต่ำหรือต่ำมากหรือเรียกว่าชั้นหินที่มีการรั่วซึม (Leaky aquifers) ความดันน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำนี้จะมีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศ น้ำจะถูกเติมเข้าหรือปล่อยออกจากชั้นหินอุ้มน้ำขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ระดับน้ำที่เกิดจากแรงดันและถูกปล่อยให้สูงขึ้นจนหยุดนิ่ง เรียกว่า Piezometric head และระดับผิวน้ำนี้จะเรียกว่า Piezometric surface ภายใต้งี๋อนไขนี้จะทำให้เกิดการอัดตัวของหินและการขยายตัวของน้ำในช่องว่าง เมื่อระดับของน้ำลดลงแรงดันของน้ำ



รูปที่ 2.6 รูปตัดขวางแสดงประเภทของชั้นหินอุ้มน้ำ

จะลดลงด้วย แต่ชั้นหินอุ้มน้ำยังคงอึดตัว ปริมาณของน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจากหนึ่งหน่วยปริมาตรของชั้นหินอุ้มน้ำเมื่อระดับของน้ำลดลงหนึ่งหน่วย เรียกว่า การกักเก็บจำเพาะ (Specific storage, S_s) ซึ่งมีหน่วยต่อระยะทาง (L^{-1}) ช่วงค่าการกักเก็บจำเพาะของชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดันดังแสดงในตารางที่

2.3

ตารางที่ 2.3 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) เป็นชั้นหินอุ้มน้ำที่อยู่ใต้เขตสัมพัทธ์อากาศ เมื่อน้ำถูกปล่อยออกมาจากชั้นหินอุ้มน้ำจะทำให้ระดับน้ำใต้ดินลดลงเนื่องจากแรงดันลดลง ปริมาตรของน้ำที่ปล่อยออกจากชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกต่อหนึ่งหน่วยความหนาเมื่อ head ของน้ำลดลงหนึ่งหน่วย เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (Specific yield, S_y) ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดันดังแสดงในตารางที่ 2.4

2.2.2 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำ

คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำที่สำคัญประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำและสัมประสิทธิ์การกักเก็บ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.4 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

2.2.2-1 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 2.5

ตารางที่ 2.5 ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของหินอุ้มน้ำ (Domenico, 1990)

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	$1.0 \times 10^{-13} - 2.0 \times 10^{-9}$

2.2.2-2 สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (Transmissivity, T)

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

$$T = K \cdot b \quad \dots (2-1)$$

- เมื่อ
- T = ค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ, $[L^2/T]$
 - K = ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, $[LT^{-1}]$
 - b = ความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำ, $[L]$

2.2.2-3 สัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage Coefficient, S)

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

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

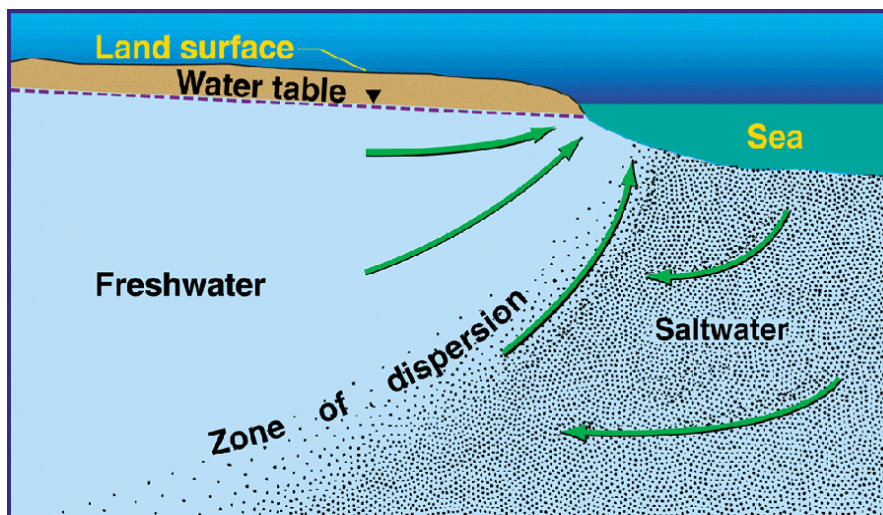
$$\text{หินอุ้มน้ำไร้แรงดัน:} \quad S = S_y + S_s b \quad \dots (2-3)$$

เมื่อ	S	=	ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำ, [-]
	S_s	=	ค่าการกักเก็บจำเพาะ, [L^{-1}]
	S_y	=	ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน, [-]
	b	=	ความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำ, [L]

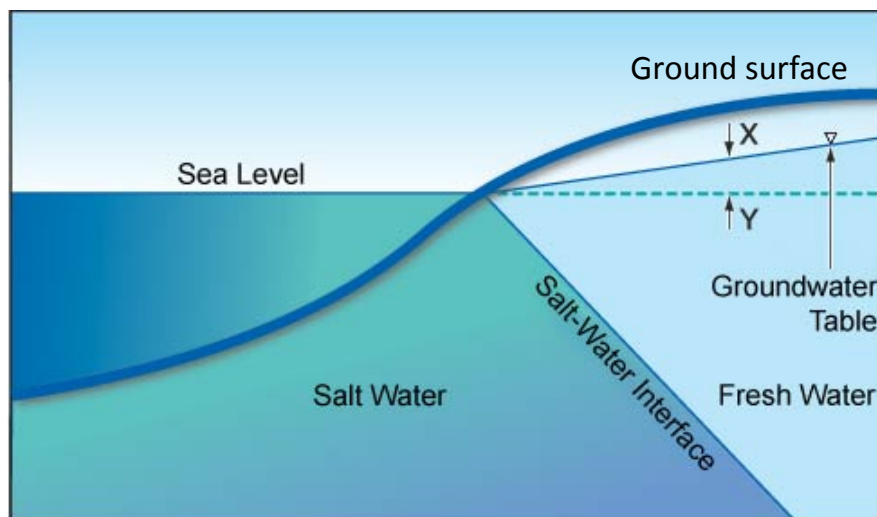
2.2.3 หลักการรูก้ำของน้ำเค็ม

ในสภาวะธรรมชาติระดับน้ำบาดาลของชั้นหินอุ้มน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลหรือบริเวณที่เชื่อมต่อกับทะเลสาบ เช่นพื้นที่ศึกษา จะลาดเอียงลงสู่ทะเลเป็นเหตุให้น้ำบาดาลจืดไหลลงสู่ทะเล ลักษณะแนวเชื่อมต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็ม (Hydraulic connection) จะเป็นรูปลิ้ม กล่าวคือ ชั้นน้ำบาดาลจืดอยู่ด้านบน ในขณะที่ชั้นน้ำบาดาลเค็มจะอยู่ด้านล่าง เนื่องจากน้ำจืดและน้ำเค็มที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน (Variable density) โดยที่น้ำจืดจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำเค็ม ทำให้แนวเชื่อมต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มจะเป็น Transitional zone จากน้ำเค็มไปสู่ น้ำจืด หรือเรียกว่าเกิดการแพร่กระจาย (Dispersion) น้ำเค็มสู่น้ำจืดนั่นเอง ซึ่งบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนระหว่างสองน้ำนี้โดยปกติความกว้างของโซนจะแคบ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของชั้นน้ำ ดังนั้นจึงถือว่าแนวนี้เป็นแนวขอบเขตระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็ม เส้นขอบเขตระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มจะไม่ชันแต่จะค่อยๆ เปลี่ยนไปเรื่อยๆ ไม่มีที่สิ้นสุด เรียกบริเวณนี้ว่า Zone of dispersion หรือ Zone of mixing (รูปที่ 2.7) ความสัมพันธ์ระหว่างแนวน้ำจืดน้ำเค็มนี้ทำให้บางส่วนของชั้นน้ำจืดอาจจะมีน้ำเค็มอยู่ ในขณะที่ส่วนอื่นๆ ยังคงเป็นน้ำจืด ความสัมพันธ์นี้สามารถถูกใช้เพื่อ

ประเมินความลึกตั้งแต่ชั้นน้ำจืดจนถึงน้ำเค็ม โดยใช้ความหนาของชั้นน้ำจืดที่อยู่เหนือระดับน้ำทะเลเป็นเกณฑ์ เรียกว่า Ghyben-Herzberg Relation (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.7 Zone of dispersion (<http://water.usgs.gov/ogw/gwrp/saltwater/salt.html>)

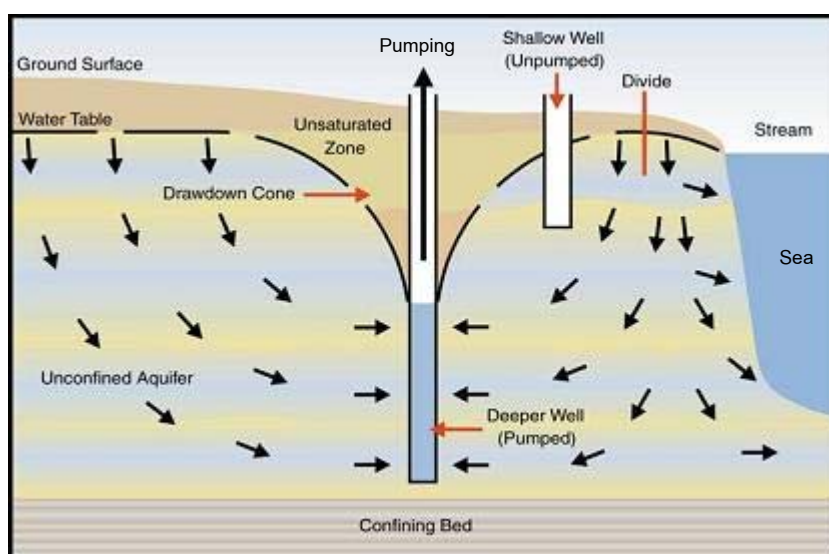


รูปที่ 2.8 Ghyben-Herzberg Relation (www.solinst.com/Res/papers/101C4Salt.html)

รูปที่ 2.8 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มที่อยู่ใต้ดินในชั้นน้ำบริเวณชายฝั่ง (Coastal aquifer) โดยตำแหน่งของรอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มจะเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของความหนาแน่นของน้ำจืดและน้ำเค็ม กล่าวได้ว่าความลึกของรอยต่อจะอยู่ได้

ระดับน้ำทะเลประมาณ 40 เท่าของความสูงของน้ำจืดที่อยู่เหนือระดับน้ำทะเล (X) หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า $Y = 40X$

เมื่อมีการเจาะบ่อบาดาลลงไปในพื้นที่ดิน และน้ำในบ่อบาดาลถูกสูบขึ้นมาใช้มากขึ้น ระดับน้ำในบริเวณใกล้เคียงจะลดลงทำให้เกิด Drawdown cone ขึ้น (รูปที่ 2.9) โดยถ้าบริเวณนั้นมีน้ำเค็มอยู่ใต้ชั้นน้ำจืด ระดับของน้ำเค็มก็จะสูบขึ้นเรียกว่า Up-coning และก็ยังเป็นการรุกรานของน้ำเค็มอีกประเภทหนึ่งนอกเหนือจากประเภทแรกที่กำลังกล่าวมาแล้วข้างต้น



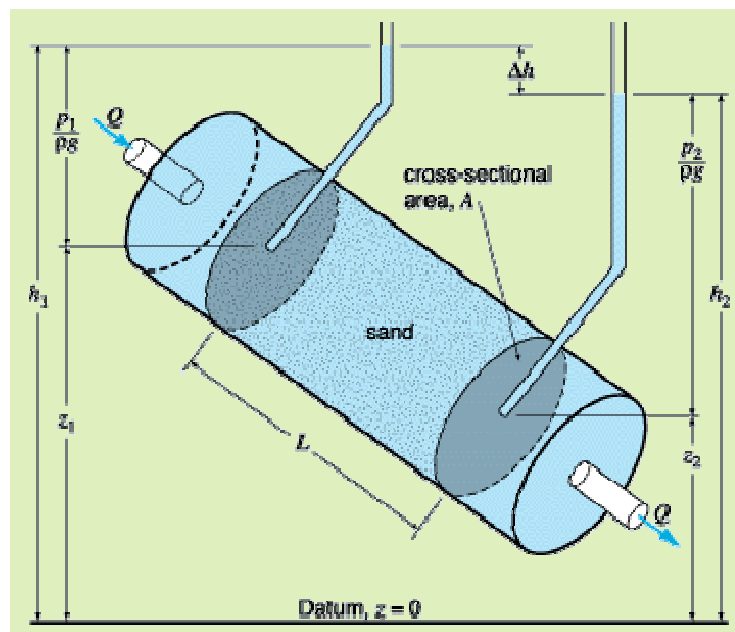
รูปที่ 2.9 ลักษณะการเกิด Drawdown cone (www.omafra.gov.on.ca)

หลักที่สำคัญต่อการรุกรานของน้ำเค็ม คือ ความดันในน้ำจืดเมื่อเทียบกับระดับน้ำทะเล ดังนั้นเพื่อป้องกันน้ำเค็มรุกรานเข้าชั้นน้ำจืดจึงจำเป็นต้องรักษาระดับความดันของน้ำจืดให้เพียงพอที่จะต้านทานการรุกรานของน้ำเค็ม ความเป็นไปได้ของการรุกรานของน้ำเค็มเข้าสู่ชั้นน้ำจืดสามารถประเมินได้โดยการวัดการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำ ซึ่งสามารถใช้วิธีการนี้เป็นเครื่องมือในการวางแผนเฝ้าระวังการรุกรานของน้ำเค็มได้ โดยชั้นน้ำที่มีการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำเหนือระดับน้ำทะเลอย่างมีนัยสำคัญ (แรงดันสูง) จะไม่มีความเสี่ยงต่อการรุกรานของน้ำเค็ม ในขณะที่ชั้นน้ำที่มีระดับน้ำใกล้เคียงกับระดับน้ำทะเล (แรงดันต่ำ) จะมีความเสี่ยงมากกว่า นั่นหมายถึง หากมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณมาก ระดับน้ำบาดาลก็จะลดลงทำให้ความดันของน้ำจืดที่จะต้านทานการรุกรานของน้ำเค็มก็ลดต่ำลง โอกาสที่น้ำเค็มจะรุกรานเข้าสู่บ่อบาดาลก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

2.2.4 การไหลของน้ำใต้ดิน

2.2.4-1 กฎของดาร์ซี (Darcy's law)

ในปี ค.ศ. 1856 Henry Darcy วิศวกรชาวฝรั่งเศสได้ทดลองหาอัตราการไหลของน้ำผ่านวัสดุที่มีความพรุน (รูปที่ 2.10) พบว่า อัตราการไหลของน้ำ (Q) ผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของระดับน้ำ ($h_2 - h_1$) แต่เป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางของการไหล ($l_2 - l_1$) (Wang and Anderson, 1982) ดังสมการ (2-4) และ (2-5) ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการทดลองของดาร์ซี (Dominico and Schwartz, 1998)

$$Q = -KA \frac{h_2 - h_1}{l_2 - l_1} \quad \dots (2-4)$$

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad \dots (2-5)$$

สมการ (2-5) อาจเขียนในรูปของอัตราการไหลต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งเป็นอัตราการไหลจำเพาะ หรือเรียกว่า ความเร็วดาร์ซี (Darcy velocity) ดังสมการ (2-6) ความเร็วในการไหลของ

น้ำต่อหน่วยพื้นที่ (v) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความลาดชันชลศาสตร์ (Hydraulic gradient; $\frac{dh}{dl}$) หรือความแตกต่างของแรงดันของน้ำต่อหน่วยระยะทาง

$$v = -K \frac{dh}{dl} \quad \dots (2-6)$$

เมื่อ v = ความเร็วการไหลของน้ำในวัตถุพรุน, [LT^{-1}]
 K = สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, [LT^{-1}]
 $\frac{dh}{dl}$ = การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำระหว่างจุด 2 จุดที่น้ำไหลผ่าน

สมการ (2-6) ใช้ได้ในกรณีที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และความเร็วของการไหลนี้ไม่ใช่ค่าความเร็วการไหลจริง เนื่องจากการคำนวณหาความเร็วที่แท้จริงต้องใช้ความเร็วของการไหลซึม (Seepage velocity) ซึ่งเป็นค่าความเร็วเฉลี่ยที่ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลผ่านช่องว่างที่อยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำ ช่องว่างหรือรูพรุนจะมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นความเร็วที่ได้จากกฎของดาร์ซีจะต่ำกว่าความเร็วของการไหลซึม ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหลซึมและความเร็วดาร์ซี เขียนได้ ดังนี้

$$v_s = \frac{v_{darcy}}{n_e} \quad \dots (2-7)$$

เมื่อ v_s = ความเร็วของการไหลซึม (Seepage velocity)
 v_{darcy} = ความเร็วดาร์ซี
 n_e = ค่าความพรุนประสิทธิผลของหิน (Effective porosity)

2.2.4-2 กฎทรงมวล (Conservation of Fluid Mass)

ตามกฎทรงมวล มวลสารที่อยู่ในปริมาตรหน่วยเล็กๆ ของชั้นน้ำจะไม่หายไปไหน ถ้าหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลสารในปริมาตรหน่วยเล็กๆ นั้น ปริมาณของมวลสารที่ไหลเข้า (Inflow) จะสมดุลกับปริมาณของมวลสารที่ไหลออก (Outflow) ดังสมการ (2-8)

$$\text{Inflow} = \text{Outflow} \quad \dots (2-8)$$

ถ้าการไหลออกน้อยกว่าการไหลเข้า จะเกิดการกักเก็บ (Storage) ของมวลสารของเหลวในปริมาตรหน่วยเล็กๆ นั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมวลสารที่ถูกกักเก็บจะมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและปริมาณน้ำที่ไหลออก ดังสมการ (2-9)

$$\text{Inflow} - \text{Outflow} = \text{Storage} \quad \dots (2-9)$$

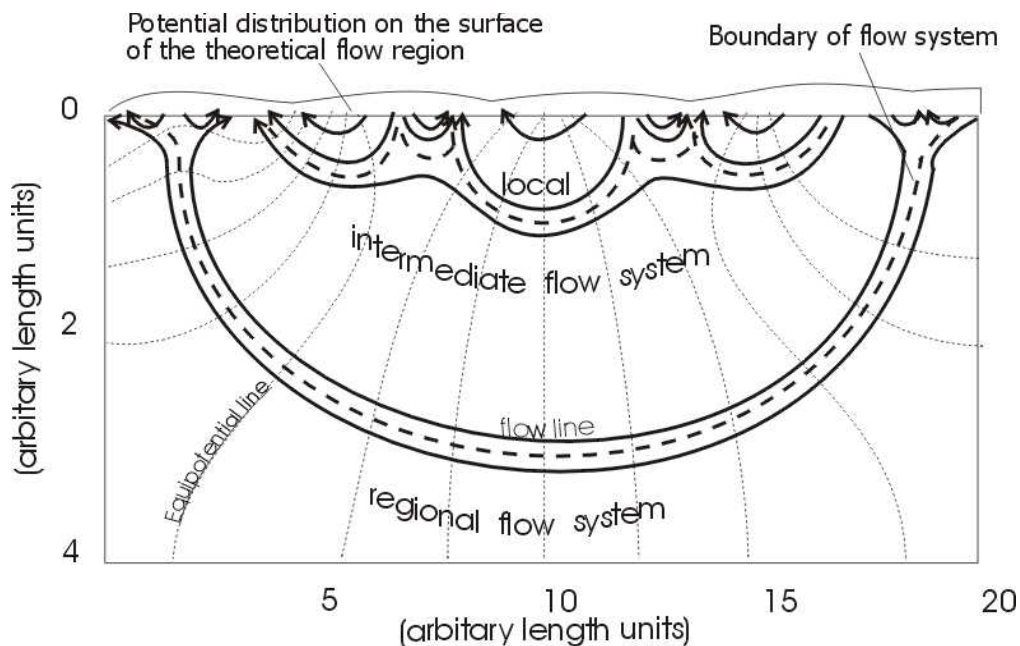
2.2.4-3 ระบบการไหลของน้ำใต้ดิน

ระบบการไหลของน้ำใต้ดิน ขึ้นกับสภาพแวดล้อมทางอุทกธรณีวิทยา (Hydro-geologic environments) ซึ่งประกอบด้วย สภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิประเทศ สภาพธรณีวิทยา อุทกธรณีเคมี และข้อมูลที่เป็นองค์ประกอบของวัฏจักรของน้ำในระบบอุทกวิทยาอื่นๆ การวิเคราะห์ระบบการไหลของน้ำใต้ดินต้องใช้ข้อมูลเหล่านี้ร่วมกับข้อมูลศาสตร์การไหลของน้ำใต้ดินในแอ่งกักเก็บ หากพิจารณาในเชิงคณิตศาสตร์ สามารถจำแนกระบบการไหลของน้ำใต้ดินในแอ่งกักเก็บได้เป็น 3 ระบบ (รูปที่ 2.11) (Toth, 1963) ดังนี้

1) ระบบการไหลเฉพาะแห่ง (Local flow system) เป็นการไหลของน้ำในระดับดิน พื้นที่รับน้ำและพื้นที่สูญเสียน้ำอยู่ในระยะใกล้กันทำให้ระยะทางและเวลาการไหลสั้น การเปลี่ยนแปลงทิศทางและอัตราการไหลของน้ำไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับความเร็วของน้ำเข้าสู่ระบบน้ำใต้ดินและการคายระเหยที่ผิว มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในแนวตั้งค่อนข้างสูง

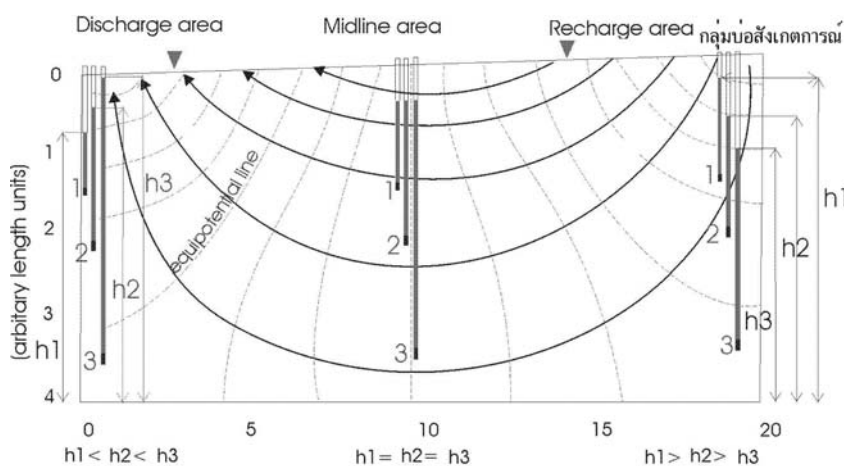
2) ระบบการไหลขนาดกลาง (Intermediate flow system) เป็นการไหลของน้ำใต้ดินที่เกิดเป็นบริเวณกว้างขึ้น ระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลน้อย

3) ระบบการไหลบริเวณกว้าง (Regional flow system) มีพื้นที่รับน้ำเป็นต้นป็นน้ำของแอ่งกักเก็บและพื้นที่สูญเสียน้ำเป็นบริเวณที่มีระดับภูมิประเทศต่ำที่สุดของแอ่งน้ำใต้ดิน มีระยะการไหลที่ไกลและลึก อัตราการไหลช้า อุณหภูมิของน้ำค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงระบบการไหลของน้ำใต้ดิน (Toth, 1963)

ระบบการไหลของน้ำใต้ดินในแต่ละระบบประกอบด้วยพื้นที่ 3 ส่วน คือ พื้นที่รับน้ำ (Recharge area) เป็นพื้นที่ที่น้ำใต้ดินไหลลง พื้นที่ปันน้ำ (Midline flow) เป็นพื้นที่ที่น้ำใต้ดินไหลในแนวราบ และพื้นที่สูญเสียน้ำ (Discharge area) เป็นพื้นที่ที่น้ำใต้ดินไหลขึ้น แต่ละระบบการไหลของน้ำใต้ดินมีความสัมพันธ์กับพื้นที่รับน้ำและพื้นที่สูญเสียน้ำ (รูปที่ 2.12) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลหรือเวลา



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงลักษณะการไหลและระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่รับน้ำ พื้นที่ปันน้ำ และพื้นที่สูญเสียน้ำ (เกรียงศักดิ์, 2543 ดัดแปลงจาก Toth, 1963)

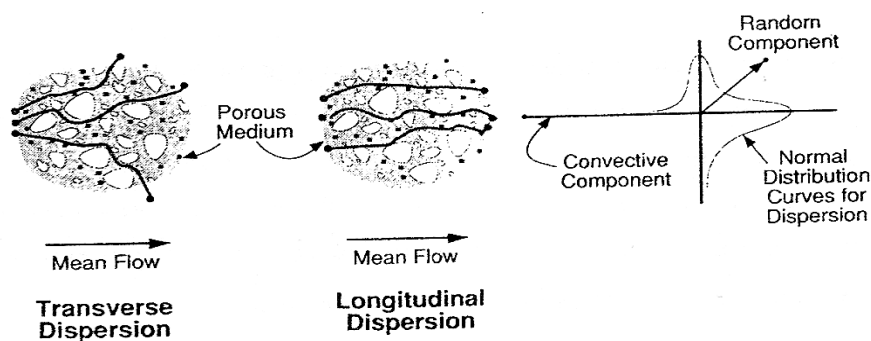
2.2.5 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

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

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

b) การเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion) เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนระหว่างจุดสองจุดในดินต่อหน่วยระยะทาง (Concentration gradient) โมเลกุลจะแพร่โดยไม่มีการไหลของน้ำ จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่ำ จนกว่าความเข้มข้นทั้งสองข้างเท่ากันจึงจะหยุดแพร่

c) การแพร่กระจายเชิงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic Dispersion) เป็นสภาพการไหลของน้ำใต้ดินแบบไม่คงตัว (Transient State) ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของสารละลายในน้ำใต้ดินเช่น สิ่งปนเปื้อนต่างๆ หรือ สารมลพิษ เป็นต้น ซึ่งมีทั้งการกระจายตัวในแนวทิศทางการไหล (Longitudinal dispersion) และการกระจายตัวในแนวทิศทางการตั้งฉากกับทิศทางการไหล (Transverse dispersion) (รูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.13 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 เช่นระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่สามารถสูบมาใช้ได้อีกต่อไป เป็นต้น สำหรับคำว่าปริมาณการใช้น้ำที่ปลอดภัย (Safe yield) เป็นคำที่มีความหมายค่อนข้างกว้างและมีความหมายใกล้เคียงกับคำอื่นเป็นจำนวนมากเช่น Permissible yield, Perennial yield เป็นต้น

ปริมาณการใช้น้ำสูงสุดที่ยอมรับได้ (Allowable yield) หมายถึง ปริมาณการใช้น้ำให้เกิดประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้สูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขของผลกระทบที่ยอมรับได้ ศักยภาพของแหล่งน้ำบาดาล โดยหลักการทั่วไปอาจพิจารณาจากปริมาณน้ำ ที่เติมให้กับชั้นน้ำใน ระยะยาว แต่ต้องพิจารณาถึงอัตราการไหลของน้ำสู่ชั้นน้ำที่ต่อเนื่องกันและชั้นน้ำที่อยู่ทางท้ายน้ำ ด้วย (Stephen et al, 2000)

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

แนวทางการประเมินศักยภาพสามารถสรุปได้เป็น 3 แนวทางหลัก (สุจริต และคณะ, 2551) คือ การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล โดย 1) การคำนวณศักยภาพโดยพิจารณาปริมาณกักเก็บน้ำบาดาล (งบดุลน้ำ) 2) การคำนวณศักยภาพจากการกินตัวของระดับน้ำ และ 3) การประเมินศักยภาพ โดยใช้แบบจำลองน้ำบาดาล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) การคำนวณศักยภาพโดยพิจารณาจากงบดุลน้ำ

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลวิธีนี้ คำนึงถึงปริมาณน้ำบาดาลที่กักเก็บไว้ในแอ่งน้ำบาดาลที่ไม่ให้มีการลดลงของปริมาณน้ำบาดาลลงไปอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือพิจารณาถึงสภาพสมดุลของปริมาณน้ำในแอ่งน้ำบาดาลดังสมการที่ (2-10)

$$\begin{aligned} \text{การเปลี่ยนแปลงปริมาณที่กักเก็บ} = & \text{ปริมาณการเติมน้ำเข้าสู่แอ่งน้ำ} + \text{ปริมาณน้ำไหลออก} \\ & \text{จากแอ่งน้ำ} + \text{ปริมาณน้ำไหลเข้าแอ่ง} - \text{ปริมาณน้ำที่ถูก} \\ & \text{สูบใช้} \end{aligned} \quad \dots(2-10)$$

วิธีนี้คำนึงถึงปริมาณน้ำไหลเข้า และปริมาณน้ำไหลออกจากแอ่งน้ำบาดาลทั้งหมดในรอบปี นั่นคือรักษาสมดุลของแอ่งน้ำบาดาลโดยให้ปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณน้ำไหลออก หรือปริมาณที่สูบขึ้นมาใช้มีค่าเท่าๆ กัน ปริมาณที่สูบขึ้นมาใช้นี้คือศักยภาพของแอ่งน้ำบาดาล หากปริมาณน้ำไหลเข้ามากเพียงพอต่อปริมาณการใช้น้ำบาดาล ปริมาณน้ำกักเก็บจะไม่ลดลงไป ซึ่งถือว่าแอ่งน้ำบาดาลยังมีศักยภาพสามารถให้น้ำบาดาล

2) การคำนวณศักยภาพจากการคืนตัวของระดับน้ำ

สำหรับการศึกษาด้วยวิธีนี้ได้คำนวณศักยภาพน้ำบาดาลเบื้องต้นจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในรอบปี พื้นที่ของแหล่งน้ำบาดาล และปริมาณน้ำจำเพาะ (Specific yield) ในกรณีของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดัน (Unconfined aquifers) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักน้ำ (Storage coefficient) แทนปริมาณน้ำจำเพาะ แสดงดังสมการที่ (2-11)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำที่เก็บกัก} = & \text{การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ} \times \text{พื้นที่ของชั้นน้ำ} \times \text{สัมประสิทธิ์ของ} \\ & \text{การเก็บกักน้ำ} \end{aligned} \quad \dots(2-11)$$

3) การประเมินศักยภาพโดยใช้แบบจำลองน้ำบาดาล

วิธีการประเมินศักยภาพโดยใช้แบบจำลองนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสภาพของน้ำบาดาล มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพของปริมาณฝน ปริมาณการใช้น้ำและปัจจัยอื่นๆ ดังนั้นการนำเอาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเหล่านี้มาพิจารณา โดยอาศัยแบบจำลองน้ำบาดาล ทำ

ให้การประเมินมีความแม่นยำขึ้น และสามารถประเมินศักยภาพในแต่ละชั้นน้ำภายใต้ภาวะเงื่อนไขต่างๆ ได้ด้วย

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Models)

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

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

ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตและค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในสมการจึงมีความแตกต่างกัน จึงต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นทุกจุดในแต่ละช่วงเวลาและพื้นที่ (Time and space) แตกต่างกันไป จากนั้นทำการประมาณค่าโดยใช้ชุดสมการอนุพันธ์ย่อยแบบต่อเนื่อง เรียกว่าแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งจะใช้ในกรณีที่ระบบชั้นน้ำมีความซับซ้อนและแบ่งออกเป็นชั้นๆ วิธีการนี้พื้นที่ของชั้นน้ำจะถูกแบ่งออกเป็นตารางย่อยๆ จำนวนมากโดยแบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมในกรณีใช้วิธี Finite difference และรูปสามเหลี่ยมหรือรูปสี่เหลี่ยมในกรณีใช้วิธี Finite-element ช่วงเวลาที่จะถูกแบ่งออกเป็นช่วงเวลาย่อยๆ โดยมีสมการพีชคณิต (Algebra) หรือชุดสมการของตัวมันเอง จากนั้นแก้

สมการโดยใช้วิธีทางเมตริก (Matrix method) เนื่องจากวิธีการนี้ใช้ระบบสมการที่ซับซ้อน ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์จึงเป็นเครื่องมือที่ลดความยุ่งยากและเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการคำนวณ (Domenico and Schwartz, 1998)

อย่างไรก็ดีการสร้างแบบจำลองให้สมบูรณ์เหมือนสภาพจริงนั้นไม่สามารถทำได้ หากไม่มีการสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของสภาพพื้นที่ เพื่อช่วยทำให้ระบบมีความง่ายและจัดระบบของข้อมูลที่เกี่ยวข้องให้อยู่ในรูปที่พร้อมจะวิเคราะห์ได้ ถ้าแบบจำลองเชิงมโนทัศน์มีความใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติมากเท่าไร ความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขก็จะเพิ่มมากขึ้น

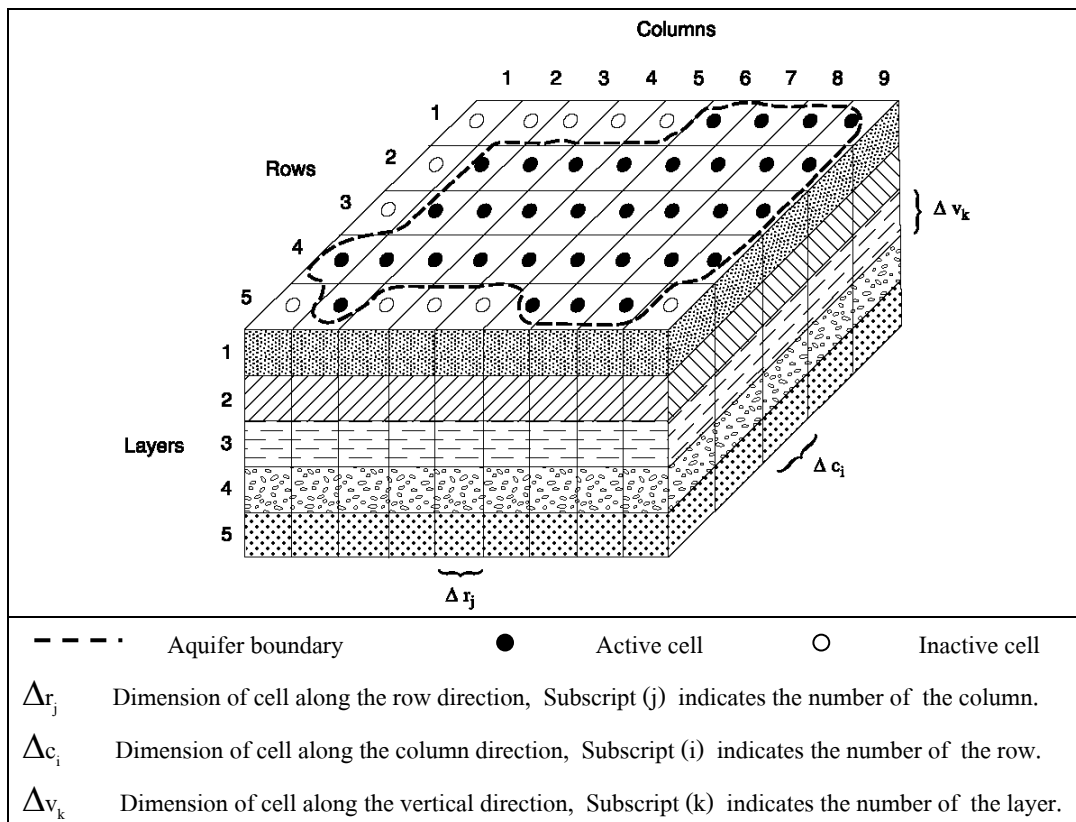
2.3.1 โปรแกรม Visual MODFLOW (V.4.1 Pro)

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 2.14) 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 SEAWAT

SEAWAT เป็น Module ย่อยหนึ่งใน Visual MODFLOW มีลักษณะพิเศษคือ เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นในจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของมวลสารในระบบ 3

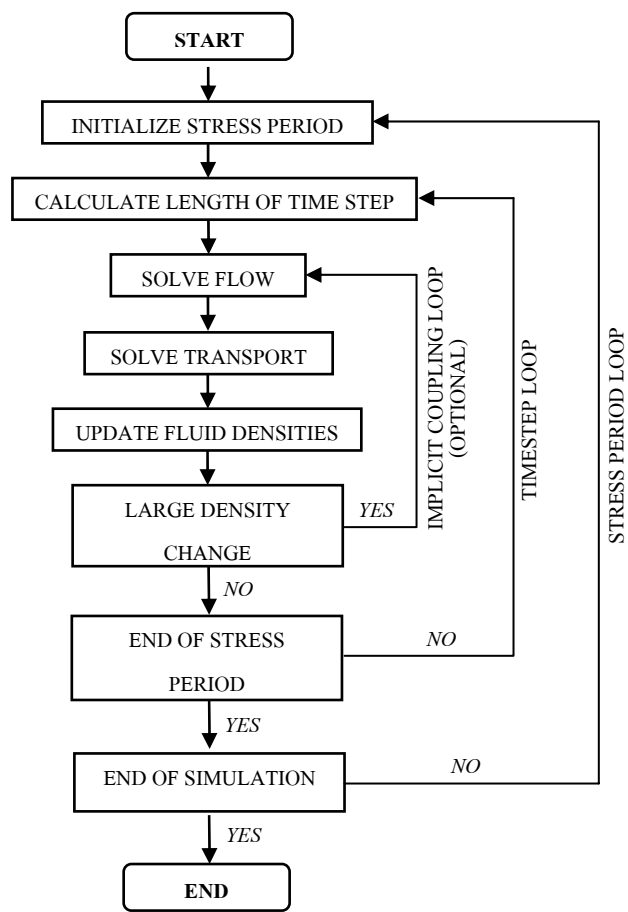


รูปที่ 2.14 ลักษณะการแบ่งพื้นที่ในการคำนวณ โดยวิธี Finite difference ใน MODFLOW

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 and Langevin (2001) โดยรวมระหว่างโปรแกรม MODFLOW กับ MT3DMS (Multi-Species Mass Transport 3D Model) เข้าด้วยกัน ทำให้การวิเคราะห์ปัญหาที่มีความสะดวก รวดเร็ว และง่ายขึ้น (Guo and Langevin, 2002) ลักษณะการทำงานของ SEAWAT ดังแสดงในรูปที่ 2.15

2.3.3 สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ใน Visual MODFLOW

2.3.3-1 สมการการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow Equation)



รูปที่ 2.15 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม SEAWAT ใน MODFLOW (จาก Guo and Langevin, 2002)

แบบจำลองเชิงตัวเลขได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหการจำลองการไหลน้ำใต้ดิน โดยใช้สมการหลัก 2 สมการ คือ สมการสมดุล (Continuity equation) และกฎของดาร์ซี (Darcy' law) (Fetter, 1994) เพื่อประยุกต์ให้ได้สมการการไหลทั่วไปของน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ (Constant density) ผ่านตัวกลางซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Heterogeneous และ Anisotropic ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient conditions) ดังสมการที่ (2-12) (ดูรายละเอียดที่มาของสมการ ในภาคผนวก ข-1)

$$\frac{\partial}{\partial x}[-K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[-K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z}[-K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z}] + R = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots(2-12)$$

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) 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 ดังนั้นความเข้มข้นของมวลสารที่เคลื่อนที่ได้ในเวลาต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-13) (Zheng and Wang, 1999)

$$\frac{\partial(nC^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[nD_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial X_j} \right] - \frac{\partial}{\partial X_i} (nV_i C^k) + q_s C_s^k + \sum_{n=1}^N R_n \quad \dots(2-13)$$

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	=	ความเข้มข้นของมวลสาร k ณ จุดที่เข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดิน [ML^{-3}]

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

สมการที่ (2-13) เป็นสมการสมดุลของมวลสาร หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของมวลสารในแต่ละหน่วยเวลา จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของมวลสารจากการแพร่กระจาย ลบด้วยอัตราการพามวลสารจากจุดนั้น บวกด้วยการเพิ่มเติมมวลสารเข้าไปในระบบหรือลบด้วยการไหลออกของมวลสารจากระบบ และรวมกับปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ที่มีผลทำให้มวลสารลดหรือเพิ่มปริมาณ หน่วงหรือเร่งความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยสามารถแบ่งย่อยๆ ตามลักษณะของการเคลื่อนที่ได้ดังนี้ (ดูรายละเอียดสมการในภาคผนวก ช-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 (2-14) ดังนี้ (Guo and Langevin, 2002) (ดูรายละเอียดที่มาของสมการ ในภาคผนวก ช-3)

1) Governing Equation for Variable Density Flow

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho K_{fx} \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho K_{fy} \left(\frac{\partial h_f}{\partial y} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_{fz} \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \right] = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + nE \frac{\partial C}{\partial t} - \rho q_s \quad \dots (2-14)$$

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 ศึกษาความสมดุลของแหล่งน้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ แอ่งหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546)

สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2546) ได้ศึกษาความสมดุลของแหล่งน้ำบาดาลแอ่งหาดใหญ่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Visual MODFLOW Version 3.00 pro รายละเอียดของผลการศึกษามีดังนี้

พื้นที่ศึกษาครอบคลุมพื้นที่จากพิกัด UTM 640000-675000E ตามแนวตะวันออก-ตะวันตกมีความกว้าง 35 กิโลเมตร จากพิกัด UTM 750000-795000N ตามแนวเหนือ-ใต้มีความยาว 45 กิโลเมตร (สิ้นสุดที่เขาวังชิง) การจำลองระบบอุทกธรณีวิทยา มีสมมติฐาน ดังนี้

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

ผลของการปรับเทียบระดับน้ำจากการคำนวณด้วยแบบจำลองในสภาวะคงที่ มีความแตกต่างของระดับน้ำที่วัดในภาคสนาม ในรูปของค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square, RMS) 5.79 เมตร หรือ 16.72 % ส่วนความคลาดเคลื่อนจากการจำลองการเปลี่ยนแปลงตามเวลา มีค่า 2.44 เมตร หรือ 15.33 %

สมดุลของน้ำบาดาลในปี พ.ศ. 2545 ที่ประเมินได้จากแบบจำลอง พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าระบบทั้งหมดประมาณ 260.37 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนปริมาณน้ำไหลออกจากระบบทั้งหมดประมาณ 259.67 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (ประเมินอัตราการใช้น้ำบาดาล 11.43 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี) การจำลองเพื่อประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในอนาคต พบว่าในรัศมี 200 เมตรในเขตตัวเมืองหาดใหญ่ควรควบคุมอัตราการใช้น้ำของชั้นน้ำบาดาลใหญ่ไม่ให้เกิน 1 เท่า ของการใช้น้ำในปี 2545 (ประมาณ 320 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน) จึงจะไม่เกิดการลดลงของระดับน้ำบาดาลมากกว่า 1 เมตร

2.4.2 การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของน้ำบาดาลแอ่งหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (อมรรัตน์, 2548)

อมรรัตน์ (2548) ศึกษาการไหลและสมดุลแหล่งน้ำบาดาลของแอ่งหาดใหญ่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW Version 2.81 รายละเอียดของผลการศึกษามีดังนี้

พื้นที่ศึกษาครอบคลุมพื้นที่จากพิกัด UTM 640000-675000E ตามแนวตะวันออก-ตะวันตก มีความกว้าง 35 กิโลเมตร จากพิกัด UTM 720000-795000N ตามแนวเหนือ-ใต้ มีความยาว 75 กิโลเมตร (สิ้นสุดที่ชายแดนไทย-มาเลเซีย) การจำลองระบบอุทกธรณีวิทยา มีสมมติฐานเช่นเดียวกับกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2546)

ผลของการปรับเทียบระดับน้ำจากการคำนวณด้วยแบบจำลองในสถานะคงที่ มีความแตกต่างของระดับน้ำที่วัดในภาคสนาม ในรูปของค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square, RMS) 2.13 เมตร หรือ 9.80 % ส่วนความคลาดเคลื่อนจากการจำลองการเปลี่ยนแปลงตามเวลา มีค่า 2.17 เมตร หรือ 9.82 % ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองพบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน อัตราการเพิ่มเติมน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะ ตามลำดับ

ผลการจำลองจากการประเมินอัตราการใช้น้ำบาดาลปี พ.ศ. 2543 เท่ากับ 16.5 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี พบว่าสมดุลของน้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2543 มีปริมาณน้ำไหลเข้าระบบเท่ากับปริมาณน้ำไหลออกจากระบบ คือประมาณ 269.25 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนการจำลองเพื่อประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในอนาคตพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการสูบน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่าของการใช้น้ำปี พ.ศ. 2543 (49.66 ล้านลบ.ม./ปี) ในช่วงเวลา 5 ปี ส่งผลให้ระดับน้ำบาดาลลดลงมากกว่า 2 เมตร ซึ่งเกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้

2.4.3 โครงการจัดทำแนวทางการพัฒนาและอนุรักษ์น้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2549)

ศึกษาสมดุลแหล่งน้ำบาดาลและการรुकล้ำของน้ำเค็มของแอ่งหาดใหญ่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW Version 4.1 รายละเอียดของผลการศึกษามีดังนี้

พื้นที่ศึกษาครอบคลุมพื้นที่จากพิกัด UTM 635000-680000E ตามแนวตะวันออก-ตะวันตก มีความกว้าง 45 กิโลเมตร จากพิกัด UTM 710000-830000N ตามแนวเหนือ-ใต้ มีความ

ยาว 120 กิโลเมตร (สิ้นสุดที่ชายแดนไทย-มาเลเซีย) การจำลองระบบอุทกธรณีวิทยา มีสมมติฐาน เช่นเดียวกับกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2546)

ผลของการเปรียบเทียบระดับน้ำจากการคำนวณด้วยแบบจำลองในสถานะคงที่ มีความแตกต่างของระดับน้ำที่วัดในภาคสนาม ในรูปของค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square, RMS) 2.722 เมตร หรือ 19.087 % ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน อัตราการเพิ่มเติมน้ำ ตามลำดับ

ผลการจำลองจากการประเมินอัตราการใช้น้ำบาดาลปี พ.ศ. 2548 เท่ากับ 40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ศึกษาสมมูลของน้ำบาดาล 2 วิธี ได้แก่ วิธี Data analysis และวิธีใช้แบบจำลอง พบว่า มีสมมูลน้ำบาดาลเท่ากับ 424 และ 420 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ ส่วนผลการจำลองเพื่อคาดการณ์การรุกคืบของน้ำเค็มในอนาคตของชั้นน้ำบาดาลใหญ่อีก 20 ปีข้างหน้า (พ.ศ. 2568) พบว่าต้องกำหนดปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย (Safe yield) เท่ากับ 100 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยยอมให้เกิดระยะน้ำลดไม่เกิน 5 เมตร จึงจะไม่เกิดการการรุกคืบของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาสู่ชั้นน้ำบาดาลใหญ่

2.4.4 การจำลองการรุกของน้ำเค็มใน Korba Coastal, Tunisia (Paniconi et al, 2000)

การศึกษาการรุกของน้ำเค็มบริเวณที่ราบลุ่มชายฝั่งทะเล Korba ประเทศตูนิเซีย โดยจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำเค็มให้แปรผันตามความหนาแน่น (Variable Density) โดยใช้โดยใช่แบบจำลองในระบบ 3 มิติ CODESA-3D (COupled variable DEnsity and SAuration) ผลการจำลองการใช้น้ำอีก 25 ปีข้างหน้า พบว่า ต้องกำหนดปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย (Safe yield) เท่ากับ 3 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี จึงจะไม่ทำให้เกิดการรุกคืบของน้ำเค็ม

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

การศึกษาการรุกของน้ำเค็มบริเวณฝั่งตะวันออกกลางของรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำเค็มให้แปรผันตามความหนาแน่น (Variable density) โดยใช้แบบจำลองในระบบ 3 มิติ Visual MODFLOW ผลการจำลองการเพิ่มอัตราการสูบ

น้ำที่ 25 ปีข้างหน้า (1995-2020) พบว่าในปี 2020 ส่งผลให้ระดับน้ำบาดาลลดลงประมาณ 6-10 ฟุต และการแพร่กระจายของคลอไรด์เพิ่มขึ้นสูงสุด 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นระยะทางประมาณ 0.5-1.0 ไมล์ จากชายฝั่ง ส่วนการเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อแบบจำลองมากที่สุดได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ขอบเขตน้ำเข้าจากภายนอก (General-head boundary) และค่าความนำคลศาสตร์ (Conductance) ตามลำดับ

บทที่ 3

งานรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ

การรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ประกอบด้วย ข้อมูลภูมิศาสตร์ ข้อมูลด้านอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลบ่อน้ำบาดาล และข้อมูลการใช้น้ำบาดาล โดยมีรายละเอียดข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.1 นำข้อมูลที่ได้จัดทำระบบฐานข้อมูลโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ด้วยโปรแกรม ArcView และสรุปข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย 1) การจัดทำภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา 2) การประเมินอัตราการเพิ่มเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาลและ 3) การประเมินอัตราการใช้น้ำบาดาล ดังมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ

ลำดับ	รายการข้อมูล	รายละเอียดข้อมูล	แหล่งข้อมูล
1	แผนที่ภูมิประเทศ	แผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1 : 50,000	กรมแผนที่ทหาร
2	ธรณีวิทยา	แผนที่ธรณีวิทยา มาตรฐาน 1 : 250,000	กรมทรัพยากรธรณี
3	อุทกธรณีวิทยา	แผนที่อุทกธรณีวิทยา มาตรฐาน 1 : 100,000	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
4	การใช้ประโยชน์ที่ดิน	แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน พ.ศ. 2543 ในระบบดิจิทัล	กรมพัฒนาที่ดิน
5	ข้อมูลบ่อน้ำบาดาล	- ระเบียบบ่อน้ำบาดาล - ข้อมูลชั้นดิน และหิน	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
6	ปริมาณน้ำฝน	ปริมาณน้ำฝนรายเดือนย้อนหลัง 20 ปี (พ.ศ. 2530-2550) จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ 10 สถานีของกรมอุตุนิยมวิทยา (รูปที่ 3.7)	กรมอุตุนิยมวิทยา
7	การคายระเหย	ข้อมูลการคายระเหย จากสถานีคองหงส์ และสถานีอำเภอสะเดา (รูปที่ 3.7)	กรมอุตุนิยมวิทยา
8	น้ำท่า	ระดับน้ำของน้ำผิวดิน จากสถานีวัดน้ำท่าลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาและคลองรัตภูมิ 6 สถานี (รูปที่ 3.7)	กรมชลประทาน
9	แม่น้ำ	แผนที่แม่น้ำสายหลักในระบบดิจิทัล	กรมชลประทาน
10	การใช้น้ำ	- น้ำประปา - น้ำบาดาล	- การประปาขนาดใหญ่ - สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สงขลา

3.1 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา

การจัดทำภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยามีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงลักษณะขอบเขตความลึก การวางตัวของชั้นน้ำบาดาลและชนิดชั้นน้ำในพื้นที่ศึกษา โดยมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. การเตรียมข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหิน (Lithology) ประกอบด้วย

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

1.2) คัดเลือกบ่อที่มีข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหิน (Lithology) แล้วนำมาพล็อตในแผนที่เพื่อดูการกระจายตัวของบ่อบาดาล เพื่อนำไปสู่การกำหนดแนวภาพตัดขวาง

1.3) กำหนดแนวภาพตัดขวางทั้งหมดในพื้นที่ 2 แนว คือ แนวตะวันออก-ตะวันตก และแนวเหนือ-ใต้ โดยในแต่ละแนวให้เลือกผ่านพื้นที่ที่มีบ่อบาดาลมากที่สุด

1.4) คัดเลือกบ่อบาดาลในแต่ละภาพตัดขวาง และทำการคัดแยกข้อมูลเพื่อจัดทำเป็นฐานข้อมูล

1.5) ปรับความลึกบ่อบาดาลให้อยู่ในหน่วยของระดับน้ำทะเลปานกลาง

1.6) ลากเส้นระดับผิวดินของแต่ละแนวภาพตัดขวาง

1.7) ใส่ข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหิน (Lithology) ของแต่ละบ่อบาดาลลงในภาพตัดขวาง ซึ่งประกอบด้วย ความลึกบ่อ ระยะเวลากรอง และชนิดชั้นดิน-ชั้นหิน

2. การวิเคราะห์แบ่งชั้นน้ำบาดาล

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

2.2) กำหนดชื่อชั้นหินอุ้มน้ำและชั้นกั้นน้ำ

จากการรวบรวมข้อมูลบ่อบาดาลที่มีข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหินในพื้นที่ศึกษาจำนวน 155 บ่อ ซึ่งกระจายทั่วพื้นที่ประกอบด้วยบ่อที่อยู่ในอำเภอหาดใหญ่จำนวน 80 บ่อ อำเภอบางกล่ำจำนวน 22 บ่อ อำเภอกวนเนียงจำนวน 18 บ่อ อำเภอคลองหอยโข่งจำนวน 15 บ่อ และอำเภอลี้จำนวน 20 บ่อ จากการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้น ทำให้สามารถเขียนภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา 5 แนว ประกอบด้วยภาพตัดขวางตามแนวตะวันตก-ตะวันออก จำนวน 4 แนว

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของแนวตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา (Cross Section)

แนว	Section	พาดผ่านอำเภอ	จำนวนบ่อ
เหนือ-ใต้	A-A'	สิงหนคร-บางกล่ำ-หาดใหญ่	26
ตะวันตก-ตะวันออก	B-B'	คลองหอยโข่ง-หาดใหญ่	5
	C-C'	หาดใหญ่	9
	D-D'	บางกล่ำ-หาดใหญ่	15
	E-E'	ควนเนียง-บางกล่ำ-หาดใหญ่	11
	รวม		

และตามแนวเหนือ-ใต้จำนวน 1 แนว โดยแสดงตำแหน่งแนวภาพตัดขวางในรูปที่ 3.1 สำหรับจำนวนบ่อนำมาทำภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา ดังแสดงตารางที่ 3.2 แนว และสามารถสรุปรายละเอียดแต่ละแนวของภาพตัดขวางได้ดังนี้

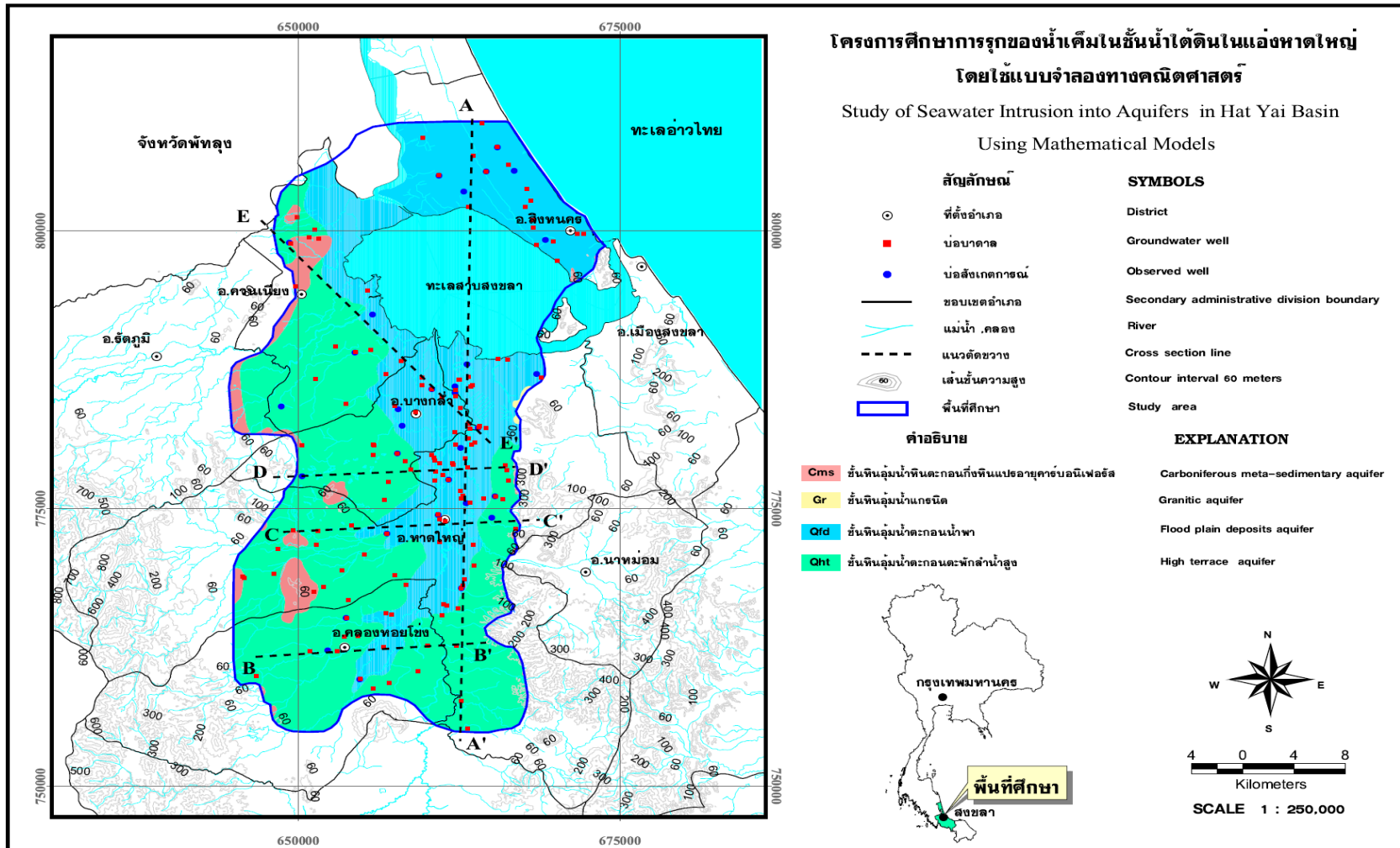
1) แนว A-A' เป็นแนวตัดขวางตามแนวเหนือ-ใต้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยเริ่มจากอำเภอสิงหนครผ่านทะเลสาบสงขลา พาดผ่านอำเภอหาดใหญ่ และอำเภอบางกล่ำบางส่วน มีความยาวของแนวตัดประมาณ 55 กิโลเมตร ข้อมูลบ่อบาดาลที่ตัดผ่านจำนวน 26 บ่อ จากการศึกษาข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหิน ข้อมูลธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา สามารถแบ่งลักษณะชั้นน้ำโดยสรุปได้ดังนี้

-ชั้นน้ำหาดใหญ่ เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดจากชั้นดินเหนียว มีความหนาเฉลี่ย 20 ม. มีความลึกตั้งแต่ -10 ม. ถึง -30 ม.(รทก.) ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวด ทรายปนดินเหนียว

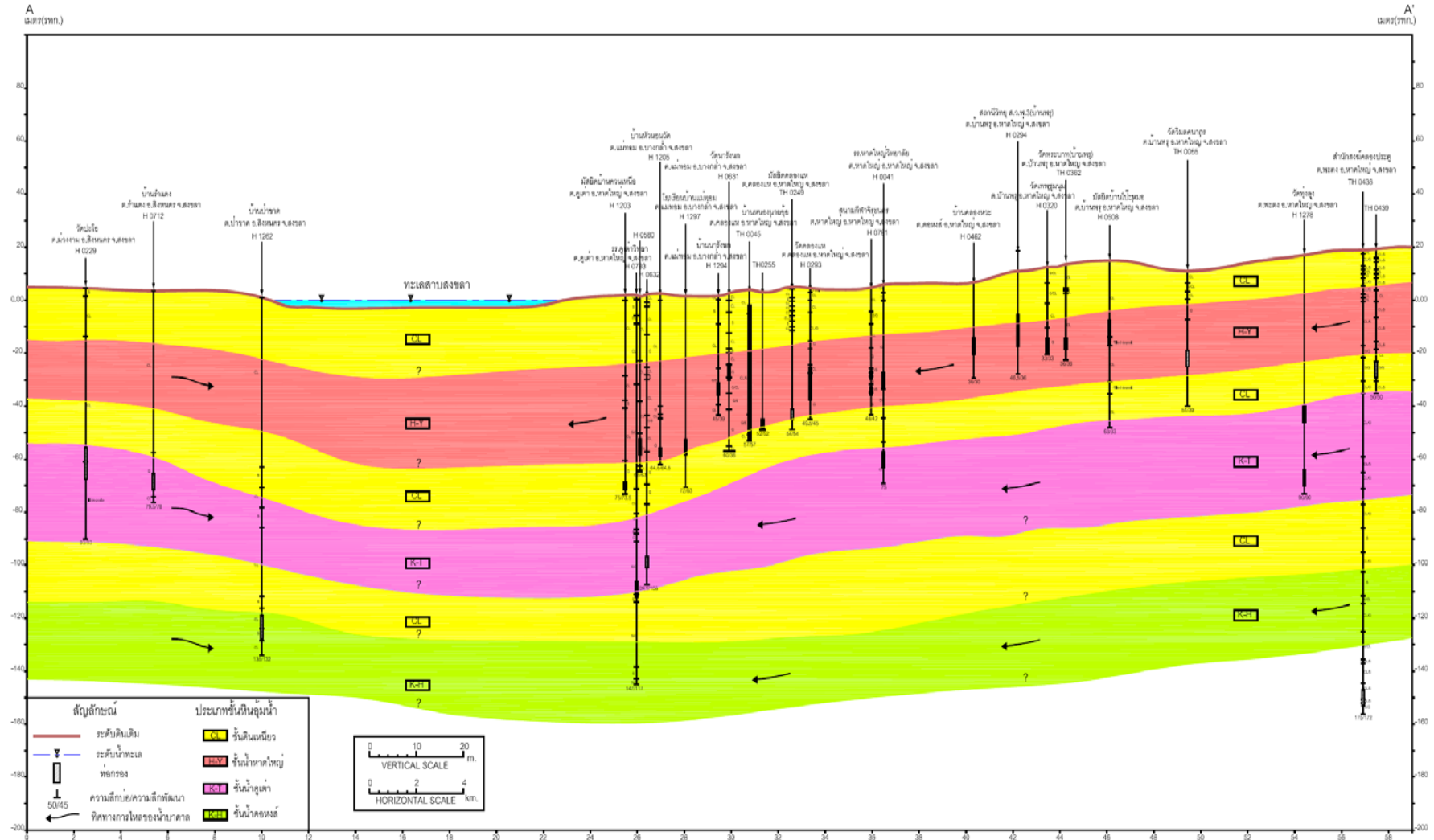
-ชั้นน้ำคูเต่า ชั้นนี้มีความลึกตั้งแต่ -45 ม. ถึง -90 ม.(รทก.) ความหนาเฉลี่ย 40 ม. ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวด และทรายปนดินเหนียว บริเวณที่พัฒนาน้ำชั้นนี้มาใช้ เช่น มัสยิดบ้านควนเหนือและโรงเรียนคูเต่าวิทยา ตำบลคูเต่า เป็นต้น

-ชั้นน้ำคองห้วย ชั้นนี้มีความหนาเฉลี่ย 30 ม. และมีความลึกตั้งแต่ -100 ม. ถึง -150 ม.(รทก.) ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวดและทราย

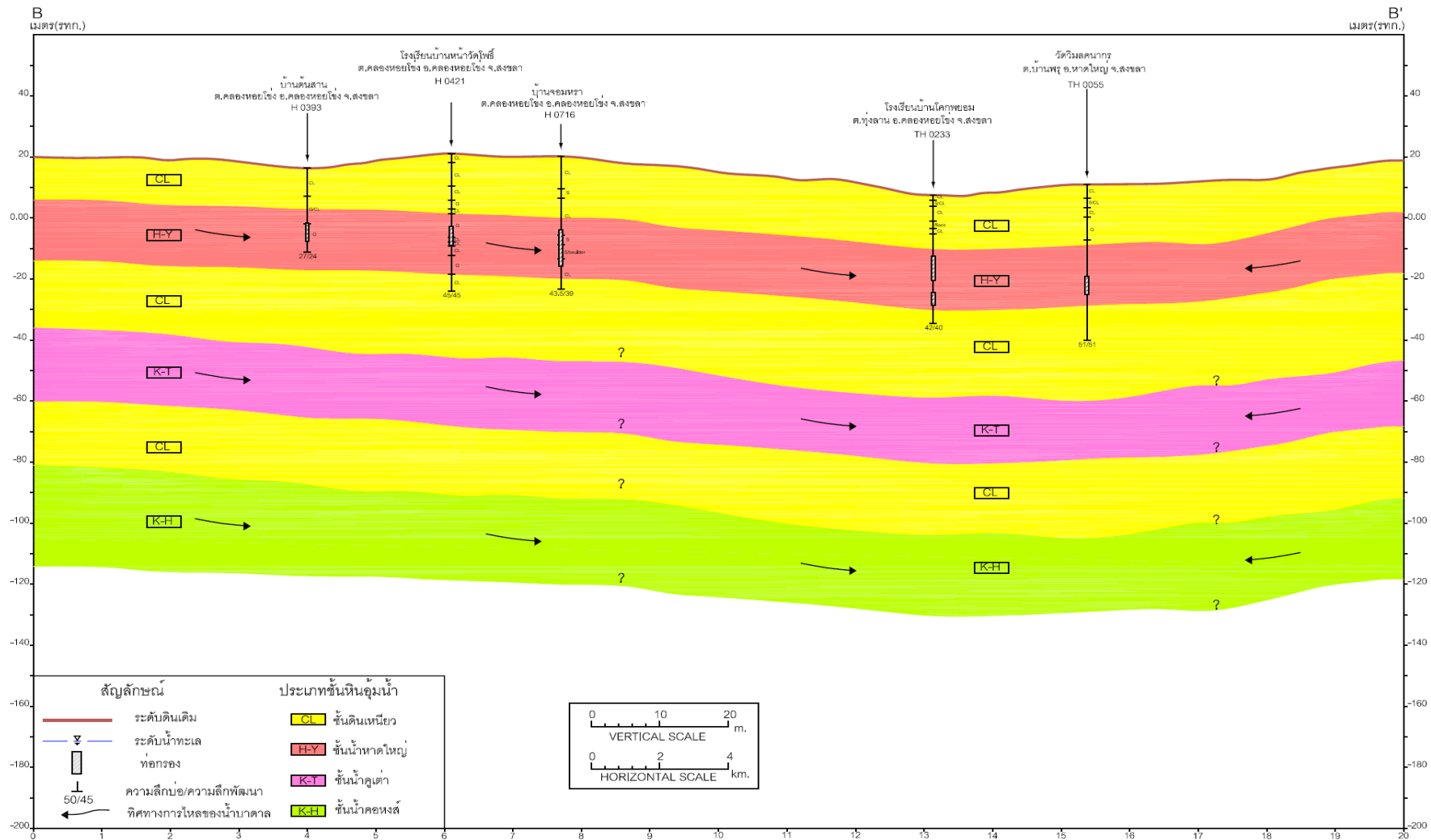
2) แนว B-B' เป็นแนวตัดขวางตามแนวตะวันตก-ตะวันออกดังแสดงในรูปที่ 3.3 พาดผ่านอำเภอกลองหอยโข่ง และอำเภอหาดใหญ่ มีความยาวของแนวประมาณ 12 กิโลเมตร ข้อมูลบ่อบาดาลที่ใช้จำนวน 5 บ่อ จากการศึกษาข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหิน ข้อมูลธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา สามารถแบ่งลักษณะชั้นน้ำโดยสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แนวตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนว A - A'



รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนว B – B'

-**ชั้นน้ำหาดใหญ่** เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดจากชั้นดินเหนียว มีความหนาเฉลี่ย 20 ม. มีความลึกตั้งแต่ -5ม. ถึง -30 ม.(รทก.) ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวด และทรายปนดินเหนียว

-**ชั้นน้ำคูเต่า** ชั้นนี้มีความลึกตั้งแต่ -40ม. ถึง -80 ม. (รทก.) ความหนาเฉลี่ย 20 ม. ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวด และทรายปนดินเหนียว

-**ชั้นน้ำคอหงส์** ชั้นนี้มีความหนาเฉลี่ย 30 ม. และมีความลึกตั้งแต่ -80 ม.ถึง -130ม. (รทก.) ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวดและทราย

3) **แนว C-C'** เป็นแนวตัดขวางตามแนวตะวันตก-ตะวันออก ดังแสดงในรูปที่ 3.4 พาดผ่านอำเภอหาดใหญ่ มีความยาวของแนวประมาณ 18 กิโลเมตร ข้อมูลบ่อบาดาลที่ใช้จำนวน 9 บ่อ จากการศึกษาข้อมูลชั้นดิน-ชั้นหิน ข้อมูลธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา สามารถแบ่งลักษณะชั้นน้ำโดยสรุปได้ดังนี้

-**ชั้นน้ำหาดใหญ่** เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดจากชั้นดินเหนียว มีความหนาเฉลี่ย 30 ม. มีความลึกตั้งแต่ +0.00ม. ถึง -40 ม. (รทก.) ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวด และทรายปนดินเหนียว

-**ชั้นน้ำคูเต่า** ชั้นนี้มีความลึกตั้งแต่ -50ม. ถึง -100 ม. (รทก.) ความหนาเฉลี่ย 20 ม. ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวด และทรายปนดินเหนียว

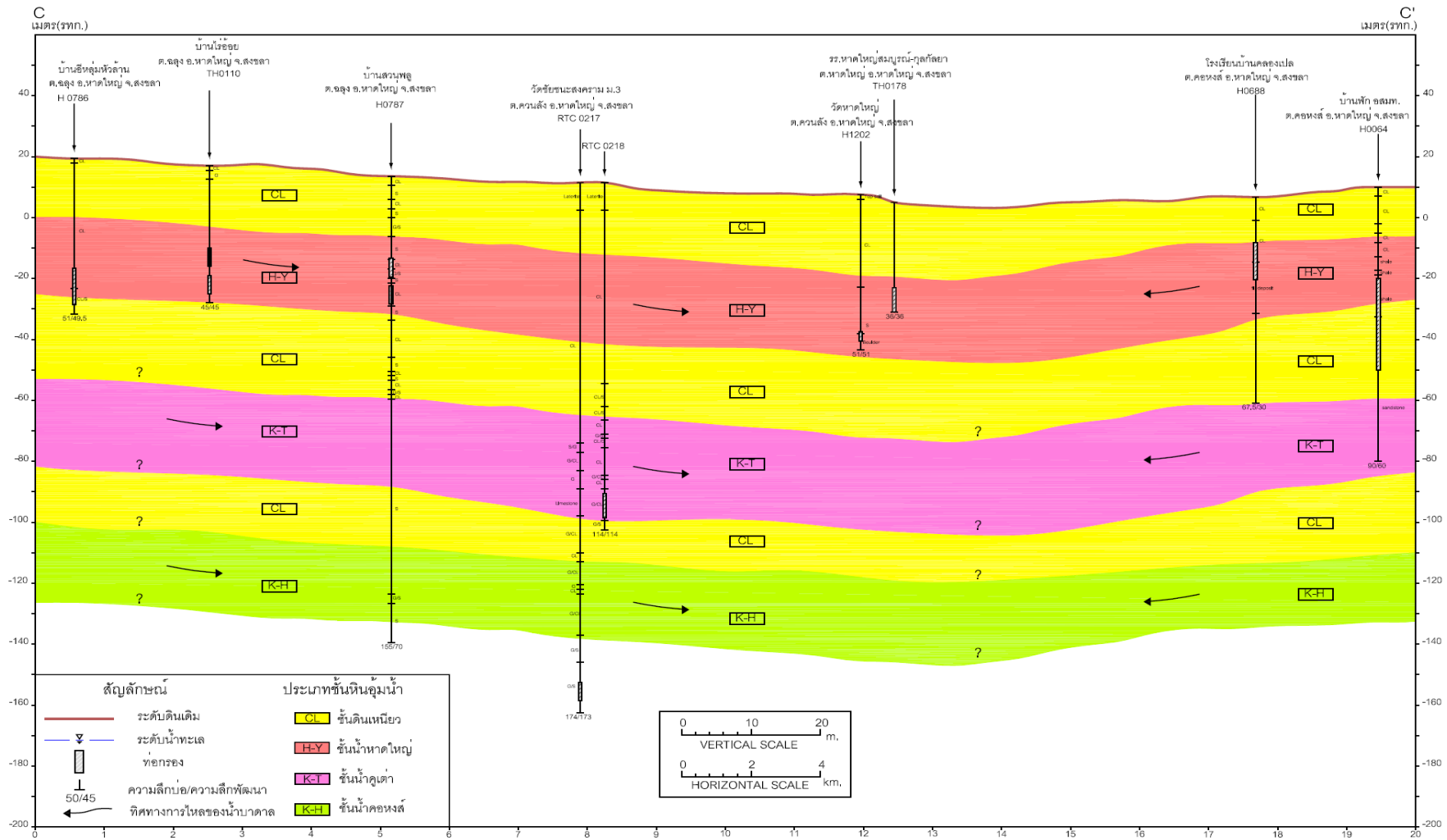
-**ชั้นน้ำคอหงส์** ชั้นนี้มีความหนาเฉลี่ย 25 ม.และมีความลึกตั้งแต่ -100 ม.ถึง-140ม. (รทก.) ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวดและทราย

4) **แนว D-D'** เป็นแนวตัดขวางตามแนวตะวันตก-ตะวันออก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 พาดผ่านอำเภอบางกล่ำ และอำเภอหาดใหญ่ มีความยาวของแนวประมาณ 19 กิโลเมตร ข้อมูลบ่อบาดาลที่ใช้จำนวน 10บ่อ จากการศึกษาข้อมูลชั้นดิน-ชั้นข้อมูลธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา สามารถแบ่งลักษณะชั้นน้ำโดยสรุปได้ดังนี้

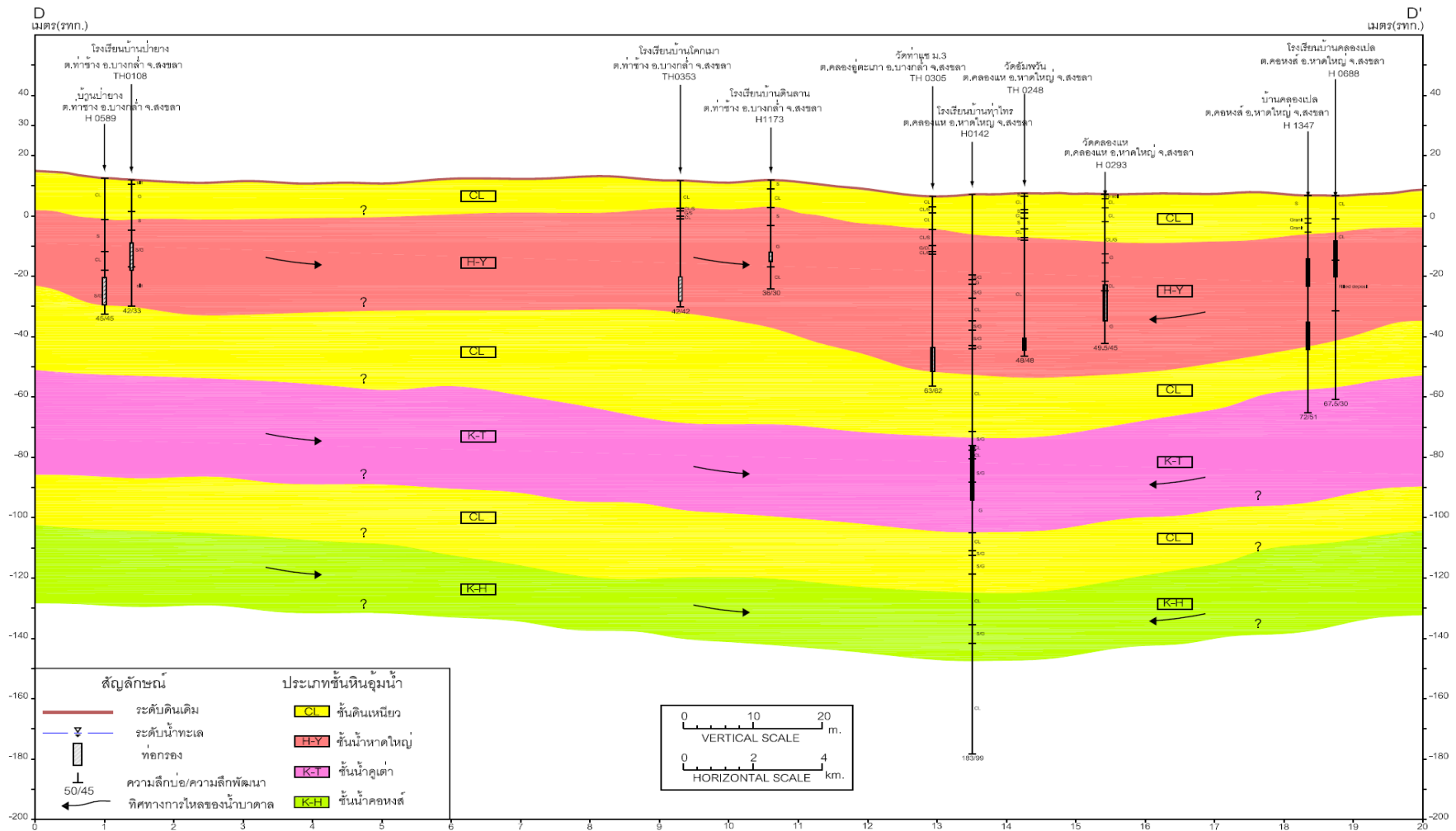
-**ชั้นน้ำหาดใหญ่** เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดจากชั้นดินเหนียว มีความหนาเฉลี่ย 30 ม. มีความลึกตั้งแต่ +0.00ม. ถึง -50 ม. (รทก.) ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวด และทรายปนดินเหนียว

-**ชั้นน้ำคูเต่า** ชั้นนี้มีความลึกตั้งแต่ -50ม. ถึง -100 ม. (รทก.) ความหนาเฉลี่ย 30 ม. ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวด และทรายปนดินเหนียว

-**ชั้นน้ำคอหงส์** ชั้นนี้มีความหนาเฉลี่ย 25 ม.ความลึกตั้งแต่ -100 ม.ถึง -150 (รทก.) ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวดและทราย



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนว C - C'



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนว D – D'

5) แนว E-E' เป็นแนวตัดขวางตามแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 พาดผ่านควนเนียง อำเภอบางกล่ำและอำเภอหาดใหญ่ มีความยาวของแนวประมาณ 25 กิโลเมตร ข้อมูลบ่อบาดาลที่ใช้จำนวน 11 บ่อ จากการศึกษาข้อมูลชั้นดิน-ชั้นข้อมูลธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา สามารถแบ่งลักษณะชั้นน้ำโดยสรุปได้ดังนี้

-**ชั้นน้ำหาดใหญ่** เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดจากชั้นดินเหนียว มีความหนาเฉลี่ย 30 ม. มีความลึกตั้งแต่ -10ม. ถึง -40 ม. (รทก.) ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวด และทรายปนดินเหนียว

-**ชั้นน้ำคูเต่า** ชั้นนี้มีความลึกตั้งแต่ -30ม. ถึง -70 ม. (รทก.) ความหนาเฉลี่ย 30 ม. ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวด และทรายปนดินเหนียว

-**ชั้นน้ำคอกหงส์** ชั้นนี้มีมีความหนาเฉลี่ย 30 ม.และมีความลึกตั้งแต่ -70 ม. ถึง -120ม. (รทก.) ดินชั้นนี้ประกอบด้วย กรวดและทราย

3.2 การประเมินอัตราการเพิ่มเติมน้ำ (Recharge)

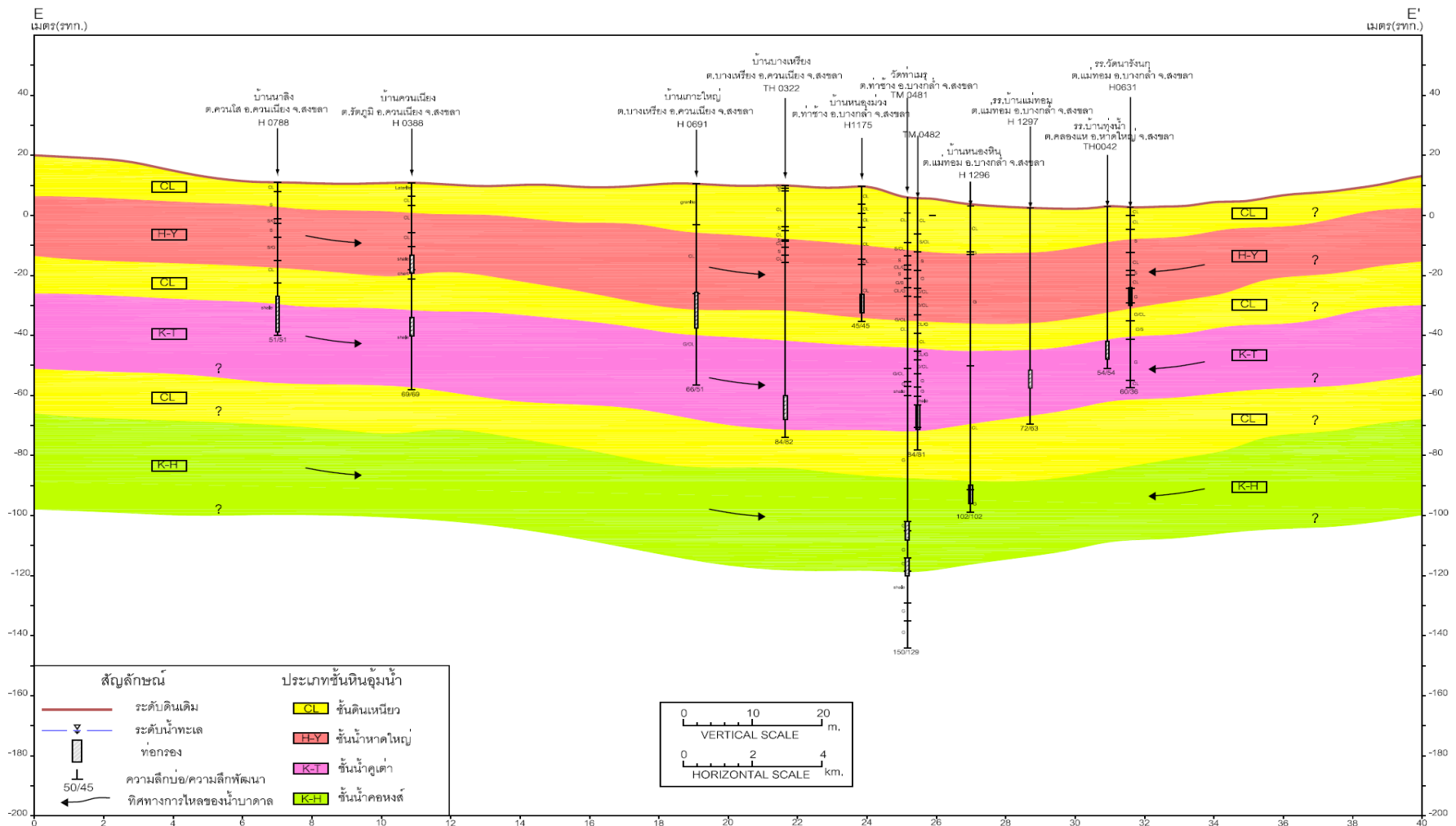
การประเมินอัตราการเพิ่มเติมน้ำ พิจารณาจากข้อมูลปริมาณน้ำฝน การคายระเหย และ ข้อมูลน้ำท่า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การเตรียมข้อมูลน้ำฝน

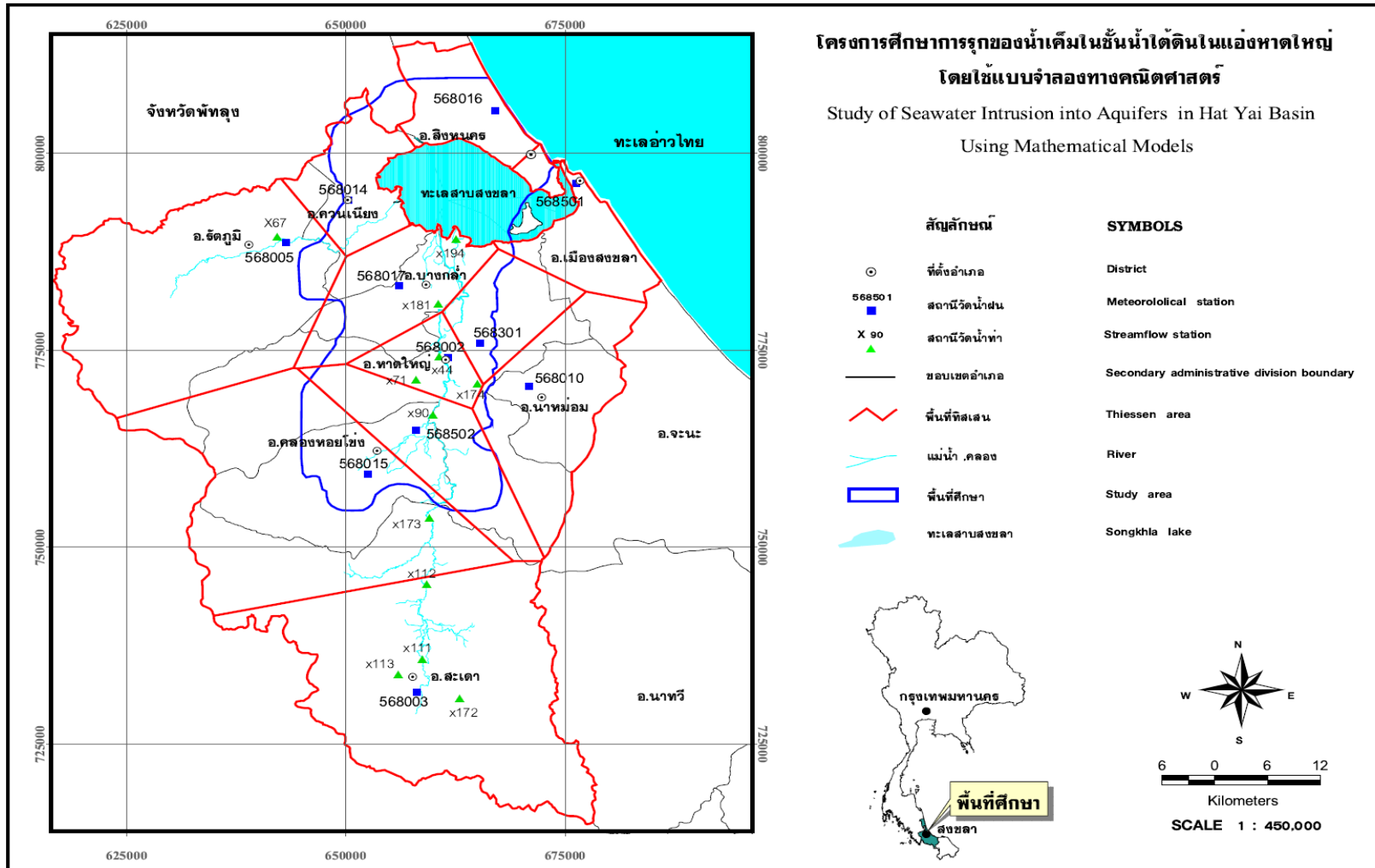
การวิเคราะห์ข้อมูลน้ำฝนได้เลือกใช้วิธีการเฉลี่ยปริมาณฝน โดยวิธีของไทเสน (Thiessen Polygon Method) ซึ่งเป็นวิธีที่มีการคิดอัตราส่วนของพื้นที่รับน้ำฝนต่อพื้นที่ทั้งหมดของพื้นที่ศึกษา (ในที่นี้ใช้ลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาและลุ่มน้ำรัตภูมิเป็นพื้นที่รับน้ำฝน) เนื่องจากสถานีวัดน้ำฝนแต่ละสถานีเป็นตัวแทนของขนาดพื้นที่รับน้ำฝนที่ไม่เท่ากัน โดยใช้ข้อมูลน้ำฝนรายเดือนย้อนหลัง 20 ปี (พ.ศ. 2530 ถึง พ.ศ. 2550) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไทเสนได้แสดงในตาราง 3.3 (รายละเอียดข้อมูลน้ำฝนแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

2) การเตรียมข้อมูลการคายระเหย

ข้อมูลการคายระเหย ได้จากสถานีตรวจอากาศคอกหงส์ และสถานีตรวจอากาศเมืองสงขลา โดยทำการเฉลี่ยข้อมูลการคายระเหยรายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ.2524 ถึง พ.ศ.2544 แต่เนื่อง



รูปที่ 3.6 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนว E – E'



รูปที่ 3.7 แผนที่แสดงพื้นที่รับน้ำฝนที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีไทเซน

จากข้อมูลการคายระเหยที่ได้เป็นค่าการคายระเหยจากภาค จึงทำการคำนวณค่าการคายระเหยจริงโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การคายระเหย จากสมการของ FAO56 โดยคำนึงถึงค่าความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม โดยค่าสัมประสิทธิ์การคายระเหยที่ใช้เท่ากับ 0.75 ปริมาณการคายระเหยเฉลี่ยที่คำนวณได้แสดงไว้ในตาราง 3.4

ตารางที่ 3.3 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่คิดอัตราส่วนของพื้นที่รับน้ำต่อพื้นที่ทั้งหมดโดยวิธีไทเสน

สถานี	สถานี	พื้นที่ ทิสเสน (ตร.กม.)	อัตรา ส่วน	เดือน												รายปี (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.	
568002	หาดใหญ่	92	0.02	1	0.6	2	2	2	1.9	2	2.2	3	4.2	6	5.8	32
568003	สะเดา	757	0.21	7	8	13	18	19	14	13	24	26	36	36	34	247
568005	รัตภูมิ	672	0.19	9	5	12	19	20	12	17	17	17	42	72	63	304
568010	นาหม่อม	236	0.07	4	3	5	5	8	8	7	8	9	16	25	24	123
568014	ควนเนียง	156	0.04	3	2	2	3	4	3	4	3	3	8	15	13	60
568015	คลองหอยโข่ง	215	0.06	4	2	4	5	5	5	4	7	6	11	14	13	80
568017	บางกล่ำ	139	0.04	3	1	2	2	3	3	3	3	3	9	11	16	61
568301	คอหงส์	315	0.09	7	4	9	9	14	12	11	13	14	23	35	35	185
568502	สนามบิน	719	0.20	12	10	19	25	22	28	18	24	27	52	56	55	349
568501	เมืองสงขลา	151	0.04	3	2.2	2	2.8	5	3.6	3	4.6	5	10.3	20	17.2	80
568016	สิงหนคร	145	0.04	2	2	3	1	3	2	3	3	3	8	16	16	62
รวม (มม.)		3,597	1.00	56	41	72	92	106	91	85	108	115	220	307	290	1,583

ตารางที่ 3.4 ปริมาณการคายระเหยเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2524-2544

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 (มม.)
การคายระเหยเฉลี่ย (มม.)	125	135	155	140	135	118	124	127	119	105	80	88	1,449
การคายระเหยจริง (มม.)	94	101	116	105	101	88	93	95	89	78	60	66	1,086

3) การเตรียมข้อมูลน้ำท่า

ข้อมูลน้ำท่าได้จากปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำคลองอุตะเกาะและคลองรัตภูมิ โดยทำการเฉลี่ยข้อมูลการน้ำท่ารายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2510 ถึง พ.ศ. 2549 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.5 (รายละเอียดสถานีวัดน้ำท่าแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 3.5 ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2510-2549

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
ปริมาณน้ำท่า (ล้าน ลบ.ม.)	237	95	105	127	144	94	92	96	138	349	658	823	2,956
ปริมาณน้ำท่า (มม.)	37	15	16	20	23	15	14	15	22	55	104	130	466

4) ปริมาณการเติมน้ำสู่พื้นที่ศึกษา

ปริมาณการเติมน้ำ (Recharge) ที่ลงสู่พื้นที่ศึกษา คำนวณได้จาก ปริมาณน้ำฝน (R) ค่าการคายระเหย (ET_p) ปริมาณการกักเก็บ (S) และปริมาณน้ำท่า (Stream) โดยทั้งหมดมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร ในการคำนวณปริมาณการเติมน้ำ (ตารางที่ 3.6) ใช้ค่าปริมาณน้ำฝนได้จากตารางที่ 3.3 และค่าการคายระเหยได้จากตารางที่ 3.4 ผลการคำนวณการเติมน้ำ พบว่าค่าปริมาณการไหลออกจากรายเดือนในช่วงเดือนตุลาคมถึงธันวาคม น้ำจะเคลื่อนที่ออกจากชั้นดินลงสู่ลำน้ำ (Stream flow) และบางส่วนไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Groundwater flow, GW) (รายละเอียดวิธีการคำนวณปริมาณการเติมน้ำแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าปริมาณการไหลออกตลอดทั้งปี (OUT_y) เท่ากับ 587 มิลลิเมตร เนื่องจากปริมาณการไหลในพื้นที่ศึกษามีตลอดทั้งปี นั่นคือระบบน้ำบาดาลป้อนน้ำเข้าสู่แม่น้ำตลอดเวลาแม้ในช่วงที่มีฝนตกน้อยหรือไม่มีฝนเลย ดังนั้นการคิดปริมาณการซึมเข้าสู่ระบบน้ำบาดาลสุทธิจะต้องคิดจากปริมาณการไหลในแม่น้ำของทั้งปี ($Stream_y$) เท่ากับ 466 มิลลิเมตร (ตารางที่ 3.5) ดังนั้นปริมาณการการเติมน้ำสุทธิรายปี (GW_{net}) เท่ากับ 121 มิลลิเมตร นั่นคือในแต่ละปีจะมีน้ำไหลลงสู่ระบบน้ำบาดาลประมาณ 121 มิลลิเมตร หรือคิดเป็น 7.64% ของปริมาณฝนทั้งปี (สอดคล้องกับ สุรพล, 2533 ประเมินไว้ 6%)

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณการเติมน้ำในพื้นที่ศึกษา

เดือน	R	ET _p	R-ET _p	S	ΔS	ET _a	Out	Stream	Recharge
มกราคม	56	94	-38	90	0	56	0	37	-37
กุมภาพันธ์	41	101	-60	40	-50	91	0	15	-15
มีนาคม	72	116	-44	25	-15	87	0	16	-16
เมษายน	92	105	-13	25	0	92	0	20	-20
พฤษภาคม	106	101	5	30	5	101	0	23	-23
มิถุนายน	91	88	3	33	3	88	0	15	-15
กรกฎาคม	85	93	-8	25	0	93	0	14	-14
สิงหาคม	108	95	13	38	13	95	0	15	-15
กันยายน	115	89	26	64	26	89	0	22	-22
ตุลาคม	220	78	142	90	26	78	116	55	61
พฤศจิกายน	307	60	247	90	0	60	247	104	143
ธันวาคม	290	66	224	90	0	66	224	130	94
รายปี	1,583	1,086	497			996	587	466	121

ดังนั้นปริมาณการเติมน้ำสู่พื้นที่ศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้ (ไม่คิดรวมทะเลสาบสงขลา)

ปริมาณน้ำฝน (1,583 มม.) x พื้นที่ (1,110 ตร.กม.) = 1,757 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ปริมาณการเติมน้ำ (121 มม.) x พื้นที่ (1,110 ตร.กม.) = 134 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

3.3 การประเมินการใช้น้ำบาดาล

ประเมินโดยการรวบรวมข้อมูลการใช้น้ำบาดาลจากประปาหมู่บ้าน ประปาเทศบาล บ่อบาดาลส่วนตัว บ่อบาดาลเอกชนและบ่อบาดาลแฝง โดยแบ่งออกเป็นการใช้น้ำจากภาคกิจกรรมหลักๆ 4 กลุ่มได้แก่ อุตสาหกรรม-ธุรกิจ อุตสาหกรรม เกษตรกรรมและ โรงแรม ปริมาณการใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา

อำเภอ	ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลูกบาศก์เมตร/ปี)				
	อุปโภค-บริโภค	อุตสาหกรรม	เกษตรกรรม	โรงแรม	รวม
คลองท่อม	901,569	34,692	636,692	-	1,572,873
หาดใหญ่	7,926,195	6,377,068	148,031	1,319,039	15,770,333
บางกล่ำ	1,551,428	914,600	377,694	-	2,801,186
ควนเนียง	1,773,477	377,694	232,903	-	2,384,074
สิงหนคร	625,610	1,884,130	-	-	2,509,740
รวม	12,778,279	9,588,184	1,352,704	1,319,039	25,028,206

ที่มา: คัดแปลงจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2549

จากการประเมินการใช้น้ำ พื้นที่ศึกษามีปริมาณการใช้น้ำบาดาลทั้งหมด 25.03 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี แบ่งเป็นใช้เพื่อการอุปโภค-บริโภค 11.97 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี อุตสาหกรรม 10.11 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เกษตรกรรม 1.63 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และ โรงแรม 1.32 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ผลการประเมินการใช้น้ำบาดาลในการศึกษาครั้งนี้สูงกว่าผลการประเมินจากการศึกษาของ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2546) ประเมินการใช้น้ำบาดาลประมาณ 11.432 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และอมรรัตน์ วัฒนธรรม (2548) ประเมินการใช้น้ำบาดาลประมาณ 16.55 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี แต่น้อยกว่าผลการประเมินของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2549) ประเมินการใช้น้ำบาดาลไว้ประมาณ 40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (รายละเอียดการใช้น้ำบาดาลแสดงไว้ในภาคผนวก จ)

บทที่ 4

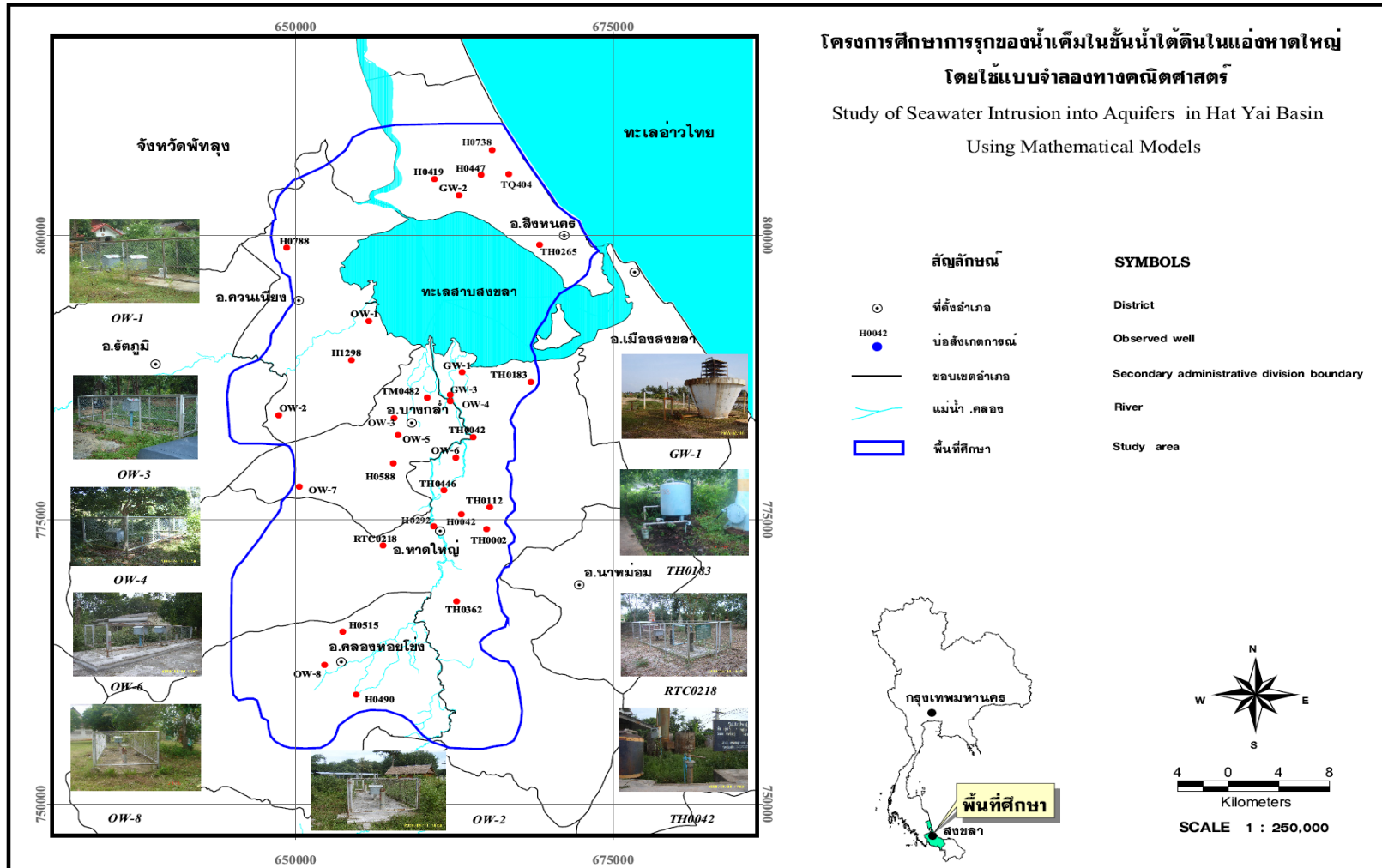
งานทดสอบและเก็บข้อมูลภาคสนาม

ทดสอบและการเก็บตัวอย่างภาคสนามประกอบด้วย 1) การสำรวจพิกัดและค่าระดับบ่อบาดาล 2) การติดตามวัดระดับน้ำและตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาลและ 3) การสูบทดสอบ (Pumping test) ซึ่งมีรายละเอียดและวิธีการดังต่อไปนี้

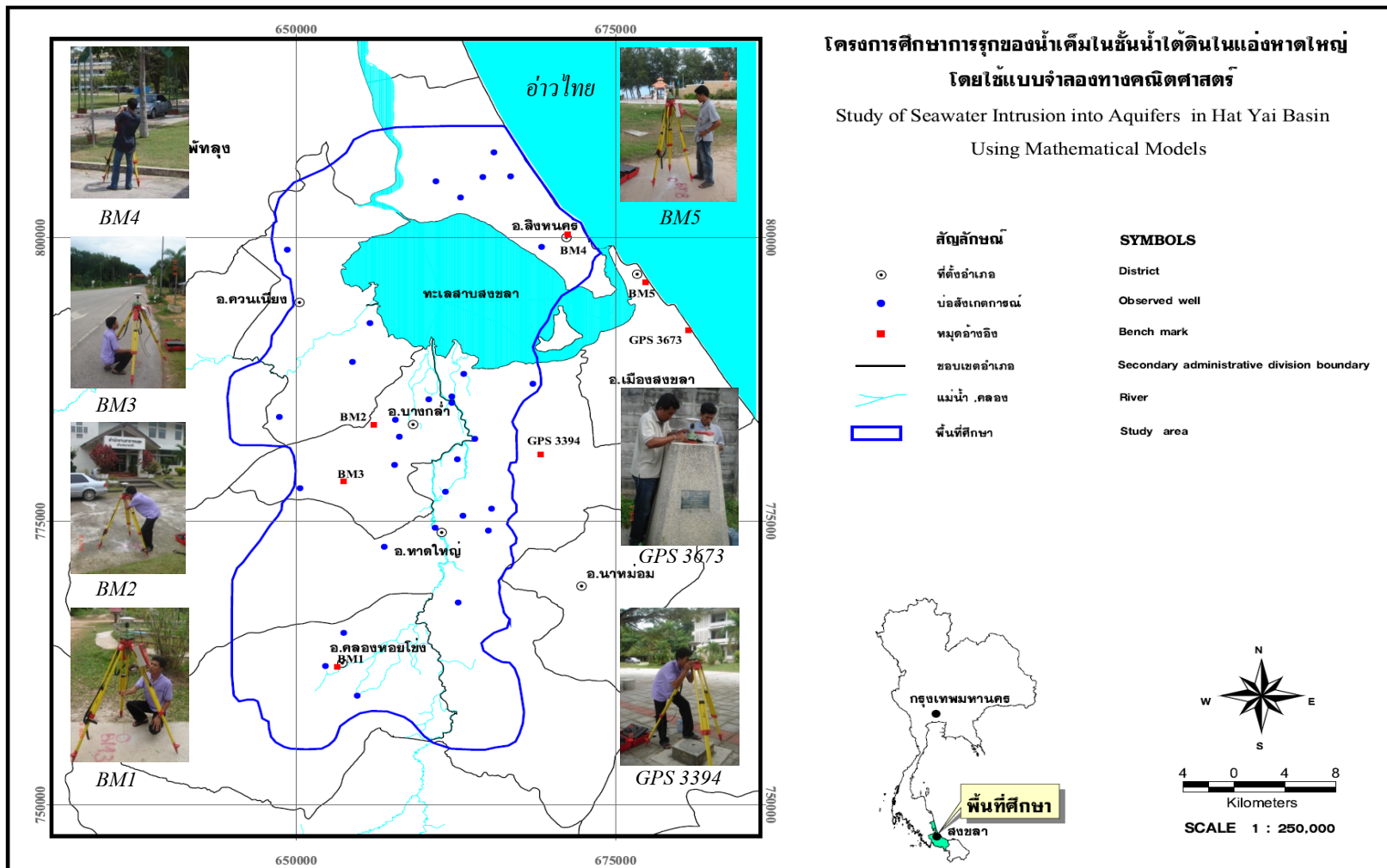
4.1 การสำรวจพิกัดและค่าระดับบ่อบาดาล

การสำรวจพิกัดและค่าระดับบ่อบาดาลวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งพิกัดและค่าระดับบ่อบาดาลนำไปใช้ในการ Input elevation แบบจำลอง โดยคัดเลือกบ่อบาดาลและบ่อสังเกตการณ์ที่เจาะโดยหน่วยงานของรัฐซึ่งกระจายตัวครอบคลุมในพื้นที่ศึกษาจำนวน 47 บ่อ (รูปที่ 4.1) โดยแบ่งออกเป็น ชั้นน้ำบาดาลใหญ่จำนวน 19 บ่อ ชั้นน้ำกู่เต้าจำนวน 14 บ่อและชั้นน้ำคองหงส์จำนวน 14 บ่อ (รายละเอียดบ่อสังเกตการณ์แสดงไว้ในภาคผนวก ก) ดำเนินการรังวัดระดับและพิกัดบ่อบาดาลจำนวน 31 บ่อ โดยใช้การสำรวจด้วยกล้อง GPS system 500 ซึ่งสามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำด้วยการตรวจวัดแบบ Static observation และระบุค่าพิกัดในระบบ UTM (WGS 84) ซึ่งในการรังวัดจะต้องใช้กล้อง GPS system 500 อย่างน้อย 2 ชุด โดยชุดแรกจะกำหนดให้เป็นชุดอ้างอิง (Reference) ส่วนชุดที่ 2 จะใช้เพื่อตรวจวัดค่า พิกัด (Rover) ในตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัด

เนื่องจากพื้นที่ศึกษามีขนาดใหญ่ ดังนั้นในการสำรวจจะต้องกำหนดหมุดควบคุม (Benchmark) จำนวน 7 หมุด เพื่อใช้ในการถ่ายค่าไปยังตำแหน่งบ่อบาดาลต่อไป เมื่ออุปกรณ์บันทึกค่าจนถึงระดับความแม่นยำที่ต้องการแล้ว นำข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดมาประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม SKI-Pro โดยทำการสอบเทียบและอ้างอิงค่ากับหมุดควบคุมหลักที่มีค่าพิกัดแล้ว สำหรับการสำรวจในครั้งนี้ กำหนดให้มีระดับความผิดพลาดได้สูงสุดไม่เกิน ± 20 ซม. ตำแหน่งหมุดควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4.2 ส่วนผลการสำรวจค่าพิกัดและระดับของบ่อบาดาลที่บันทึกด้วยกล้อง GPS system 500 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 (ภาพการสำรวจในสนามและค่าระดับบ่อบาดาลแสดงไว้ในภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.1 แผนที่แสดงตำแหน่งบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 4.2 แผนที่แสดงหมุดควบคุมในการสำรวจค่าระดับบ่อบาดาลด้วยกล้อง GPS System 500

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดค่าพิกัดและระดับบ่อน้ำบาดาลด้วยกล้อง GPS System 500

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	พิกัดบ่อ		สถานี	ตำบล	อำเภอ	ค่าระดับ ม. (รทก.)
		ออก-ตก	เหนือ- ใต้				
1	H0042	663017	775446	เทศบาลนครหาดใหญ่	หาดใหญ่	หาดใหญ่	9.389
2	H0292	660858	774119	วัดหาดใหญ่ใน	ควนลัง	หาดใหญ่	7.071
3	H0419	661002	804878	วัดบ่อทราย	ป่ากรอ	สิงหนคร	1.597
4	H0447	664446	805047	อบต.บ้านหนองโดน	ร่าแดง	สิงหนคร	1.976
5	H0490	654892	759625	วัดโลกเหรียญ	ทุ่งลาน	คลองหอยโข่ง	19.769
6	H0515	653734	765102	วัดเลียบ	คลองหอยโข่ง	คลองหอยโข่ง	18.826
7	H0588	657731	780220	บ้านห้วยหลอ	ท่าช้าง	บางกล่ำ	3.866
8	H0738	665837	806911	โรงเรียนบ้านขนุน	วัดขนุน	สิงหนคร	3.886
9	H0788	649258	798920	วัดโพธิ์ธรรมาราม	ควนโศ	ควนเนียง	4.853
10	H1298	654406	789053	วัดป่าก้นดงษ์	บางเหรียญ	ควนเนียง	7.370
11	TH0002	665417	774332	รพ.สงขลานครินทร์	คลองหอย	หาดใหญ่	14.584
12	TH0042	663990	782351	โรงเรียนบ้านทุ่งน้ำ	คลองแห	หาดใหญ่	3.293
13	TH0112	665382	776062	วัดหงษ์ประดิษฐาราม	คลองหอย	หาดใหญ่	6.710
14	TH0183	668860	786809	บ้านท่านางหอม	น้ำน้อย	หาดใหญ่	5.010
15	TH0265	669224	799178	วัดธรรมโมชน์	สตึงหม้อ	สิงหนคร	2.662
16	TH0362	663003	767490	วัดพระบาท (บ้านพรุ)	บ้านพรุ	หาดใหญ่	14.097
17	TH0445	661747	777529	วัดแก้วสว่างธรรม	คลองแห	หาดใหญ่	6.362
18	TM0482	660495	788372	วัดท่าเมรุ	บางกล่ำ	บางกล่ำ	2.237
19	TQ404	666760	805399	วัดดีหลวงนอก	ชิงโค	สิงหนคร	4.50
20	RTC217	658425	768138	วัดชัยชนะสงคราม	ควนลัง	หาดใหญ่	15.837
21	OW-1	655784	792462	วัดโลกเมือง	บางเหรียญ	ควนเนียง	3.866
22	OW-2	648692	784174	บ้านแพรกสุวรรณ	บางเหรียญ	ควนเนียง	32.778
23	OW-3	657506	784218	วัดบางกล่ำ	บางกล่ำ	บางกล่ำ	3.087
24	OW-4	661667	784908	ฌาปนสถานหนองหิน	แม่ทอม	บางกล่ำ	3.082
25	OW-5	658077	782428	วัดท่าช้าง	ท่าช้าง	บางกล่ำ	3.561
26	OW-6	662523	780346	วัดโดนดแสงทอง	คลองแห	หาดใหญ่	5.249
27	OW-7	648768	777820	วัดป่ายาง	ท่าช้าง	บางกล่ำ	57.525
28	OW-8	652276	762207	วัดโพธิ์	คลองหอยโข่ง	คลองหอยโข่ง	20.532
29	GW-1	663097	787965	ม.7 ต.คูเต่า	คูเต่า	หาดใหญ่	2.200
30	GW-2	662891	803539	ท.3 บ้านเทพยา	ป่าขาด	สิงหนคร	1.629
31	GW-3	662205	785965	ม.6 ต.คูเต่า	คูเต่า	หาดใหญ่	2.430

4.2 การติดตามวัดระดับน้ำและตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาล

การติดตามวัดระดับน้ำและตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ งานติดตามระดับน้ำและเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลมาตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาลในห้องปฏิบัติการ การติดตามข้อมูลดังกล่าวได้ดำเนินการทุกๆ 3 เดือน จำนวน 4 ครั้ง ได้แก่ ครั้งที่ 1 เดือนสิงหาคม 2550 ครั้งที่ 2 เดือนพฤศจิกายน 2550 ครั้งที่ 3 เดือนกุมภาพันธ์ 2551 และ ครั้งที่ 4 เดือนพฤษภาคม 2551

1) การตรวจวัดระดับน้ำ

การตรวจวัดระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์ที่คัดเลือกไว้ เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในรอบปีและใช้เปรียบเทียบแบบจำลอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดระดับน้ำประกอบด้วย ชุดวัดระดับน้ำและตลับเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ซ้าย) ภาพการวัดระดับน้ำในสนาม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ซ้าย) ส่วนภาพแสดงระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำบาดาลใหญ่ ชั้นน้ำเกลือและชั้นน้ำคองกรี (เดือนพฤษภาคม 2551) ดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ (ผลการตรวจวัดระดับน้ำทั้ง 4 ครั้งแสดงไว้ใน ภาคผนวก ง)

ผลการตรวจวัดระดับน้ำทั้ง 3 ชั้น จำนวน 4 ครั้ง พบว่า ระดับแรงดันน้ำจะสูงบริเวณขอบแอ่งทางทิศตะวันตก (เทือกเขาบรรทัด) ทิศตะวันออก (เทือกเขาคองกรี) และทิศใต้ (เขาวังชิง) แล้วลดระดับต่ำลงบริเวณกลางแอ่งจนถึงทะเลสาบสงขลา ส่วนทางทิศเหนือของแอ่งบริเวณอำเภอสิงหนคร พบว่าโดยเฉลี่ยระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลปานกลาง นอกจากนี้พบว่าระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล นั่นคือมีระดับสูงช่วงฤดูฝนและลดลงในช่วงฤดูแล้ง

2) การตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาล

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ที่คัดเลือกไว้ นำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ pH, TDS, Salinity, Conductivity และ Chloride โดยพารามิเตอร์สำคัญที่แสดงการรุกรานของน้ำเค็มและใช้เปรียบเทียบแบบจำลองด้วยคือ ปริมาณคลอไรด์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลประกอบด้วย กระจกเก็บน้ำและ

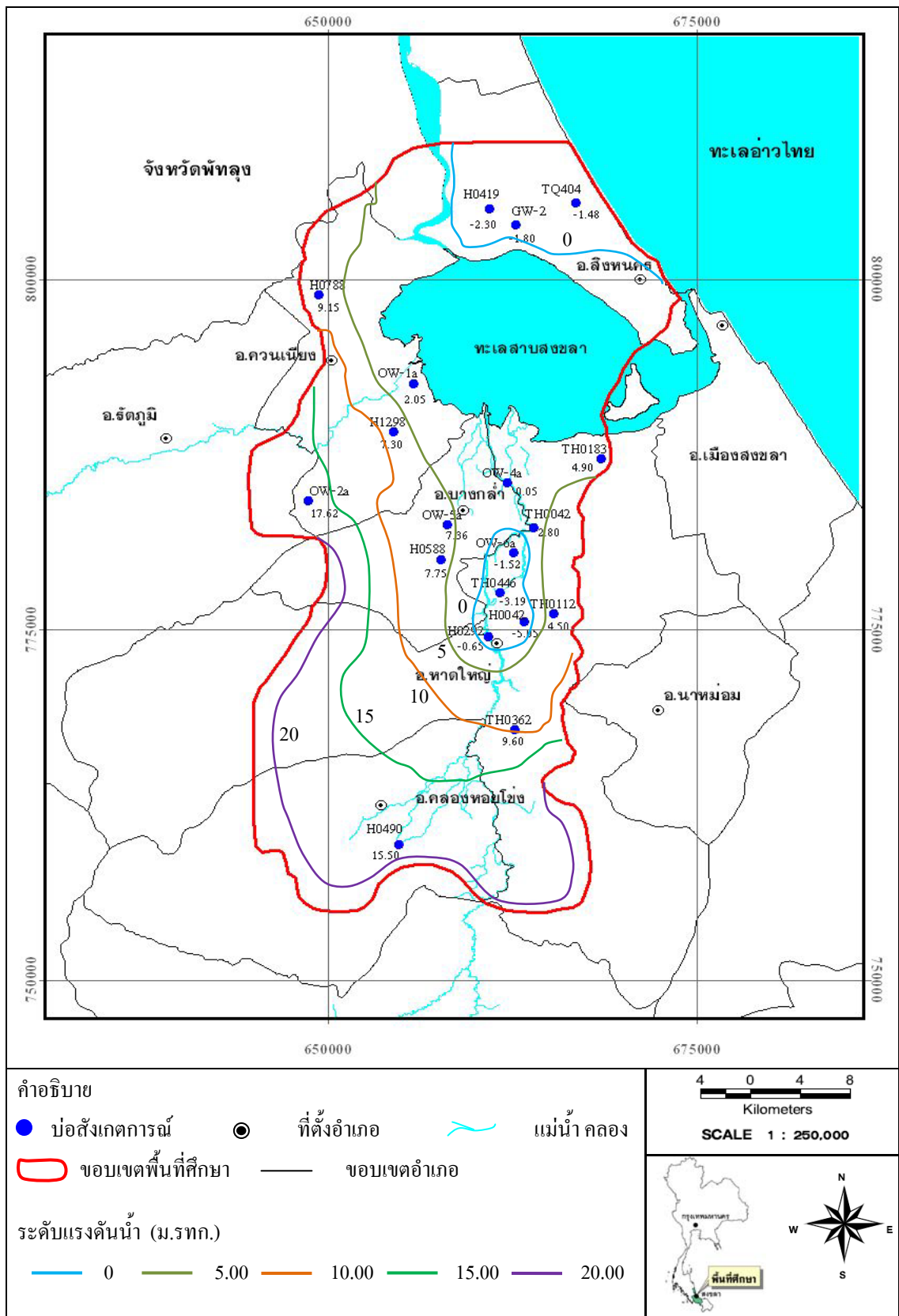
ขวดเก็บตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ขวา) ภาพการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในสนามดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ขวา)



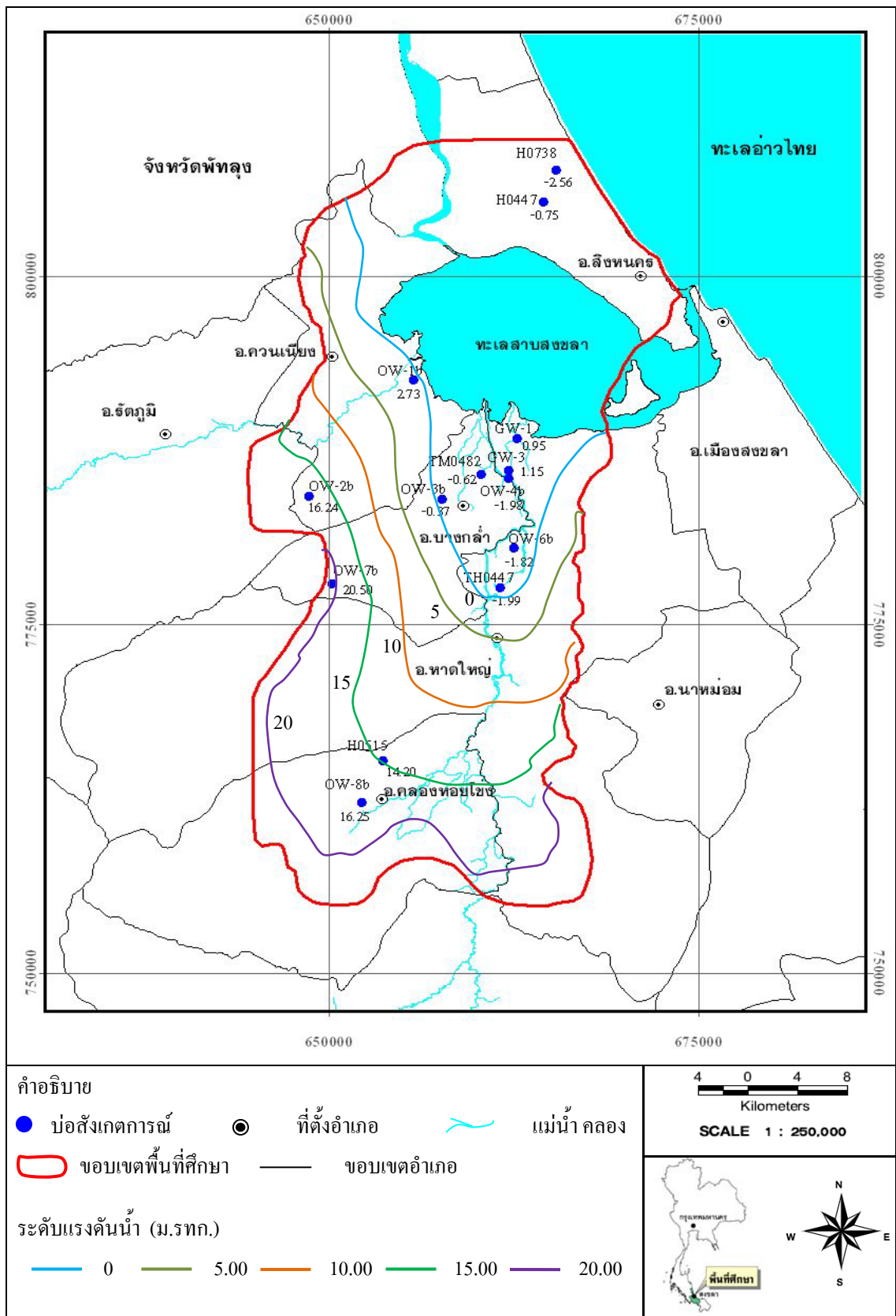
รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ (ซ้าย) อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำบาดาล (ขวา)



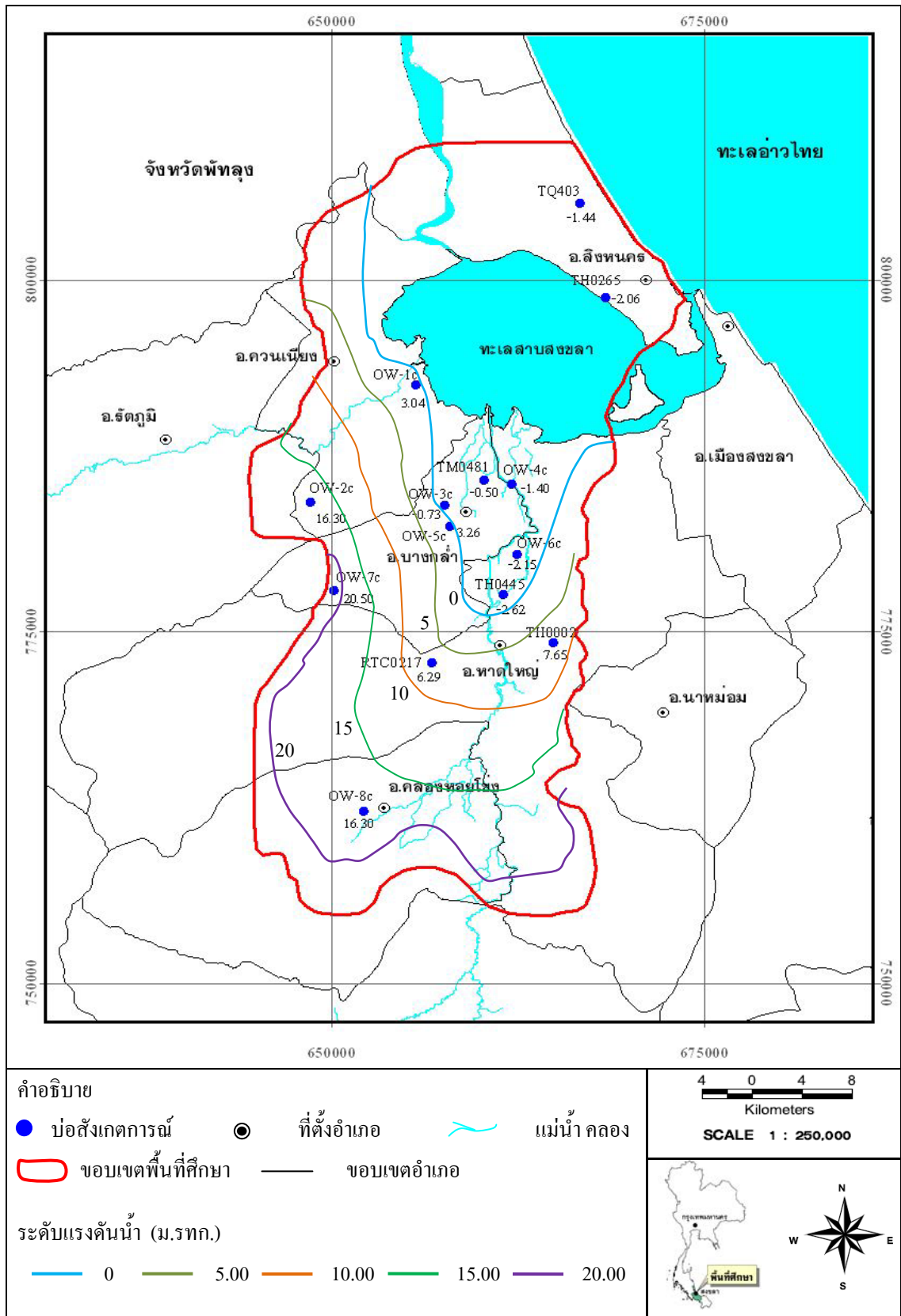
รูปที่ 4.4 การตรวจวัดระดับน้ำในสนาม (ซ้าย) การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในสนาม (ขวา)



รูปที่ 4.5 ระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำหาดใหญ่, (พฤษภาคม 2551)



รูปที่ 4.6 ระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำกู่เต่า, (พฤษภาคม 2551)



รูปที่ 4.7 ระดับแรงดันน้ำใต้ดินชั้นน้ำคองหงส์, (พฤษภาคม 2551)

2.1 คุณภาพน้ำบาดาลชั้นน้ำบาดาลใหญ่

ผลการตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างน้ำบาดาลในชั้นน้ำบาดาลใหญ่ทั้ง 4 ครั้ง จำนวน 19 บ่อ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปคุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำบาดาลใหญ่

พารามิเตอร์	หน่วย	ช่วงข้อมูล	ค่ามาตรฐาน
กรด-ด่าง, pH	-	2.82-8.54	7-8.5
ความเค็ม, Salinity	ppt.	0-4.0	<0.5
ความนำไฟฟ้า, Conductivity	uS/cm	26.5-7,268	
ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้, TDS	mg/L	17.6-4,952	<600
คลอไรด์, Chloride	mg/L	2.41-2,598.30	<250

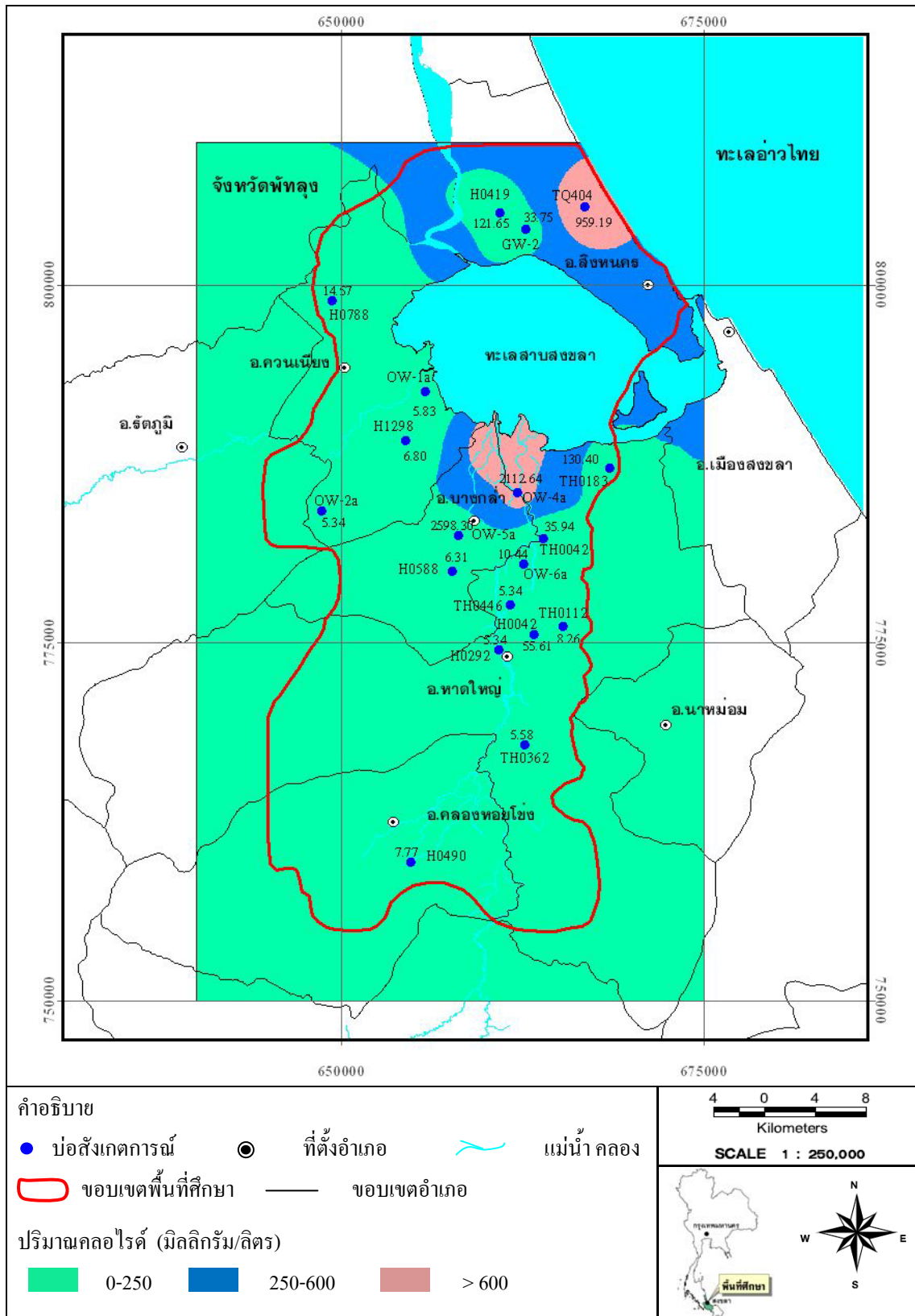
1) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) พื้นที่ศึกษามีค่า pH อยู่ระหว่าง 2.28-8.54 และต่ำกว่ามาตรฐานน้ำดื่มเล็กน้อยคือมีค่า pH เฉลี่ย 6.14 มก./ล.

2) ความเค็ม (Salinity) พื้นที่ศึกษามีค่าความเค็ม อยู่ระหว่าง 0-4.0 ppt. โดยทั่วไปน้ำจะเริ่มมีรสเค็มเมื่อมีค่ามากกว่า 0.5 ppt. ซึ่งบ่อบาดาลที่มีค่าความเค็มมากกว่า 0.5 จะจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย

3) ความนำไฟฟ้า (Conductivity) พื้นที่ศึกษามีค่าความนำไฟฟ้า อยู่ระหว่าง 26.5-7,268 uS/cm.

4) สารทั้งหมดที่ละลายได้ (TDS) พื้นที่ศึกษา น้ำบาดาลมีปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ อยู่ระหว่าง 17.6-4,952 มก./ล. บ่อบาดาลที่มีค่า TDS สูงกว่ามาตรฐานจะจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทยเท่านั้น

5) คลอไรด์ (Cl) พื้นที่ศึกษาปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี คือมีค่าระหว่าง 2.41-2,598 มก./ล. ซึ่งบ่อบาดาลที่มีค่าคลอไรด์ สูงกว่ามาตรฐานจะจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทยเท่านั้น ได้แก่ บริเวณวัดท่าช้าง ป่าช้าหนองหิน และวัดศิหลวงนอก ตามลำดับ ส่วนภาพการกระจายตัวของคลอไรด์ ในชั้นน้ำบาดาลใหญ่ (เดือนพฤษภาคม 2551) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ (ชั้นน้ำหาดใหญ่, พฤษภาคม 2551)

2.2 คุณภาพน้ำบาดาลชั้นน้ำคูเต่า

ผลการตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างน้ำบาดาลในชั้นน้ำคูเต่าทั้ง 4 ครั้ง จำนวน 14 บ่อ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปคุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำคูเต่า

พารามิเตอร์	หน่วย	ช่วงข้อมูล	ค่ามาตรฐาน
กรด-ด่าง, pH	-	3.63-8.96	7-8.5
ความเค็ม, Salinity	ppt.	0-0.7	<0.5
ความนำไฟฟ้า, Conductivity	uS/cm	88-1,445	
ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้, TDS	mg/L	32.9-982	<600
คลอไรด์, Chloride	mg/L	0.97-174.11	<250

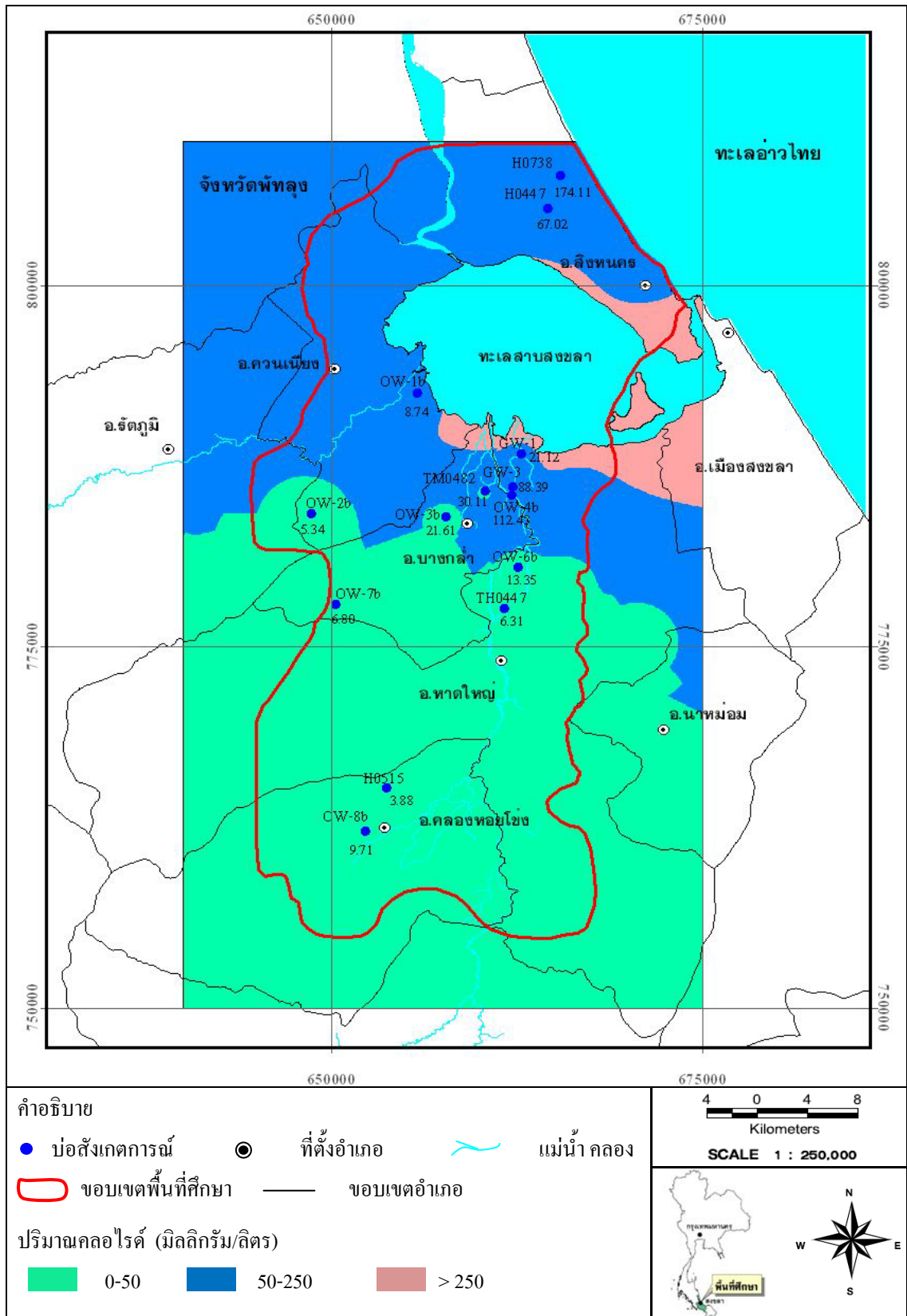
1) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) พื้นที่ศึกษามีค่า pH อยู่ระหว่าง 3.63-8.96 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มคือมีค่า pH เฉลี่ย 7.07 มก./ล.

2) ความเค็ม (Salinity) พื้นที่ศึกษามีค่าความเค็มน้อยคือ อยู่ระหว่าง 0-0.7 ppt. โดยทั่วไปน้ำจะเริ่มมีรสเค็มเมื่อมีค่ามากกว่า 0.5 ppt. ซึ่งบ่อบาดาลที่มีค่าความเค็มมากกว่า 0.5 จะจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาเท่านั้น

3) ความนำไฟฟ้า (Conductivity) พื้นที่ศึกษามีค่าความนำไฟฟ้า อยู่ระหว่าง 88-1,445 uS/cm.

4) สารทั้งหมดที่ละลายได้ (TDS) พื้นที่ศึกษาน้ำบาดาลมีปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ อยู่ในเกณฑ์ดีคืออยู่ระหว่าง 32.9-982 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ย 307.94 มก./ล. ซึ่งบ่อบาดาลที่มีค่า TDS สูงกว่ามาตรฐานจะจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลอ่าวไทยเท่านั้น

5) คลอไรด์ (Cl) พื้นที่ศึกษาปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี คือมีค่าระหว่าง 0.97-174.11 มก./ล. ส่วนภาพการกระจายตัวของคลอไรด์ในชั้นน้ำคูเต่า (เดือนพฤษภาคม 2551) ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ (ชั้นน้ำคูเต่า, พฤษภาคม 2551)

2.3 คุณภาพน้ำบาดาลชั้นน้ำคองหงส์

ผลการตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างน้ำบาดาลในชั้นน้ำคองหงส์ทั้ง 4 ครั้ง จำนวน 14 บ่อ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปคุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำคองหงส์

พารามิเตอร์	หน่วย	ช่วงข้อมูล	ค่ามาตรฐาน
กรด-ด่าง, pH	-	4.53-8.77	7-8.5
ความเค็ม, Salinity	ppt.	0-1.9	<0.5
ความนำไฟฟ้า, Conductivity	uS/cm	88-3,836	
ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้, TDS	mg/L	60-2,508	<600
คลอไรด์, Chloride	mg/L	1.71-1,384.14	<250

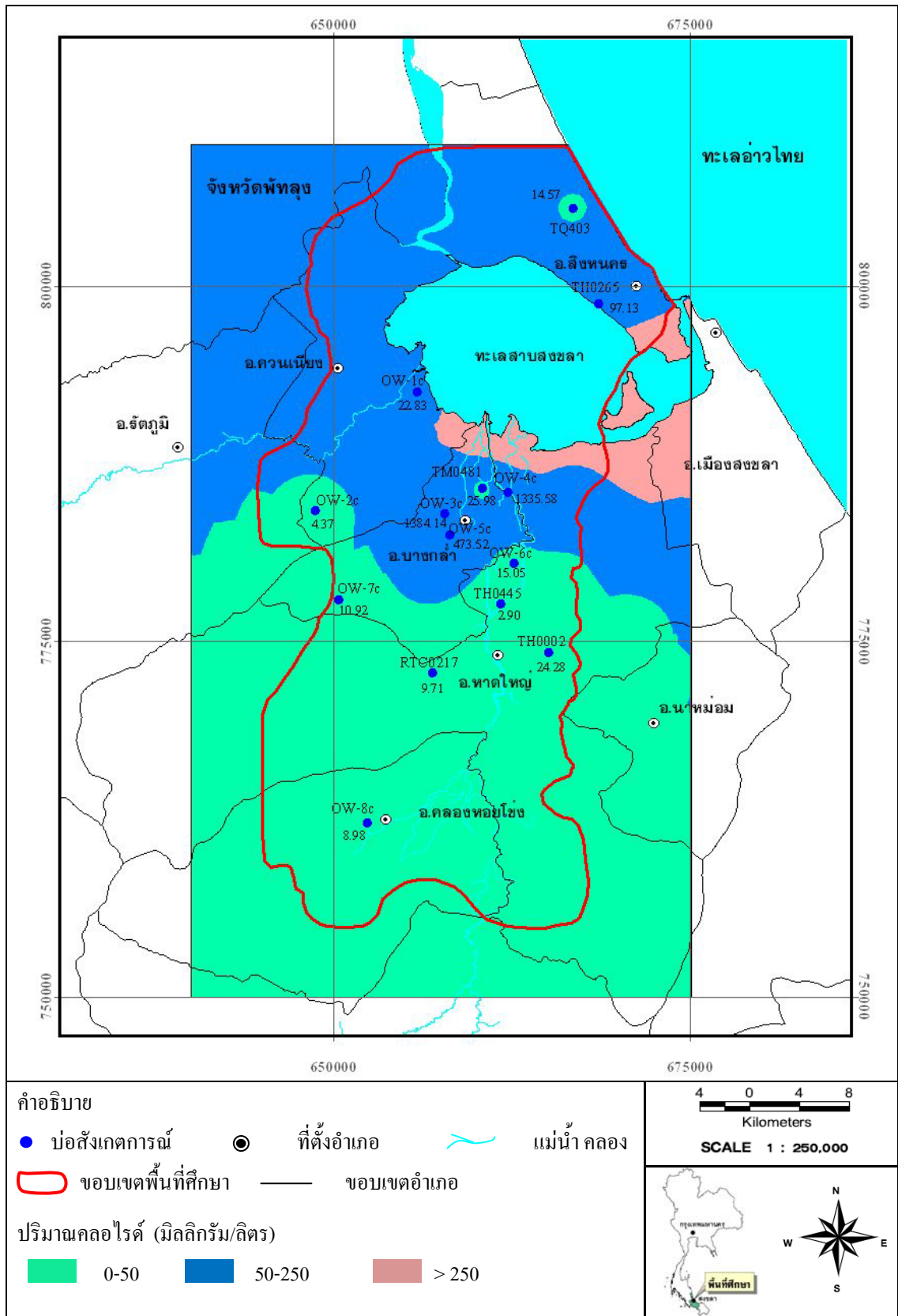
1) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) พื้นที่ศึกษามีค่า pH อยู่ระหว่าง 4.53-8.77 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มเล็กคือมีค่า pH เฉลี่ย 7.4 มก./ล.

2) ความเค็ม (Salinity) พื้นที่ศึกษามีค่าความเค็ม อยู่ระหว่าง 0-1.9 ppt. โดยทั่วไปน้ำจะเริ่มมีรสเค็มเมื่อมีค่ามากกว่า 0.5 ppt. ซึ่งบ่อบาดาลที่มีค่าความเค็มมากกว่า 0.5 จะจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาเท่านั้น

3) ความนำไฟฟ้า (Conductivity) พื้นที่ศึกษามีค่าความนำไฟฟ้า อยู่ระหว่าง 88-3,836 uS/cm.

4) สารทั้งหมดที่ละลายได้ (TDS) พื้นที่ศึกษาน้ำบาดาลมีปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ อยู่ระหว่าง 60-2,508 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ย 546.76 มก./ล. ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มส่วนบ่อบาดาลที่มีค่า TDS สูงกว่ามาตรฐานจะจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาเท่านั้น

5) คลอไรด์ (Cl) พื้นที่ศึกษาปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี คือมีค่าระหว่าง 1.71-1,384.14 มก./ล. ส่วนบ่อบาดาลที่มีค่าคลอไรด์ สูงกว่ามาตรฐานจะจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาเท่านั้น ได้แก่ บริเวณวัดท่าช้าง ป่าช้าหนองหิน เป็นต้น ภาพการกระจายตัวของคลอไรด์ของชั้นน้ำคองหงส์ (เดือนพฤษภาคม 2551) ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ปริมาณคลอไรด์ของบ่อสังเกตการณ์ (ชั้นน้ำคองส์, พฤษภาคม 2551)

4.3 การสูบน้ำทดสอบ (Pumping Test)

การสูบน้ำทดสอบมีจุดประสงค์ที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเพื่อหาสมรรถภาพและประสิทธิภาพของบ่อสูบน้ำ โดยแสดงจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่สูบ (Yield) และระยะน้ำลด (Drawdown) ที่วัดได้และประการที่สอง เพื่อคำนวณหาคุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifers) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (Transmissivity) และคุณสมบัติการกักเก็บ (Storage)

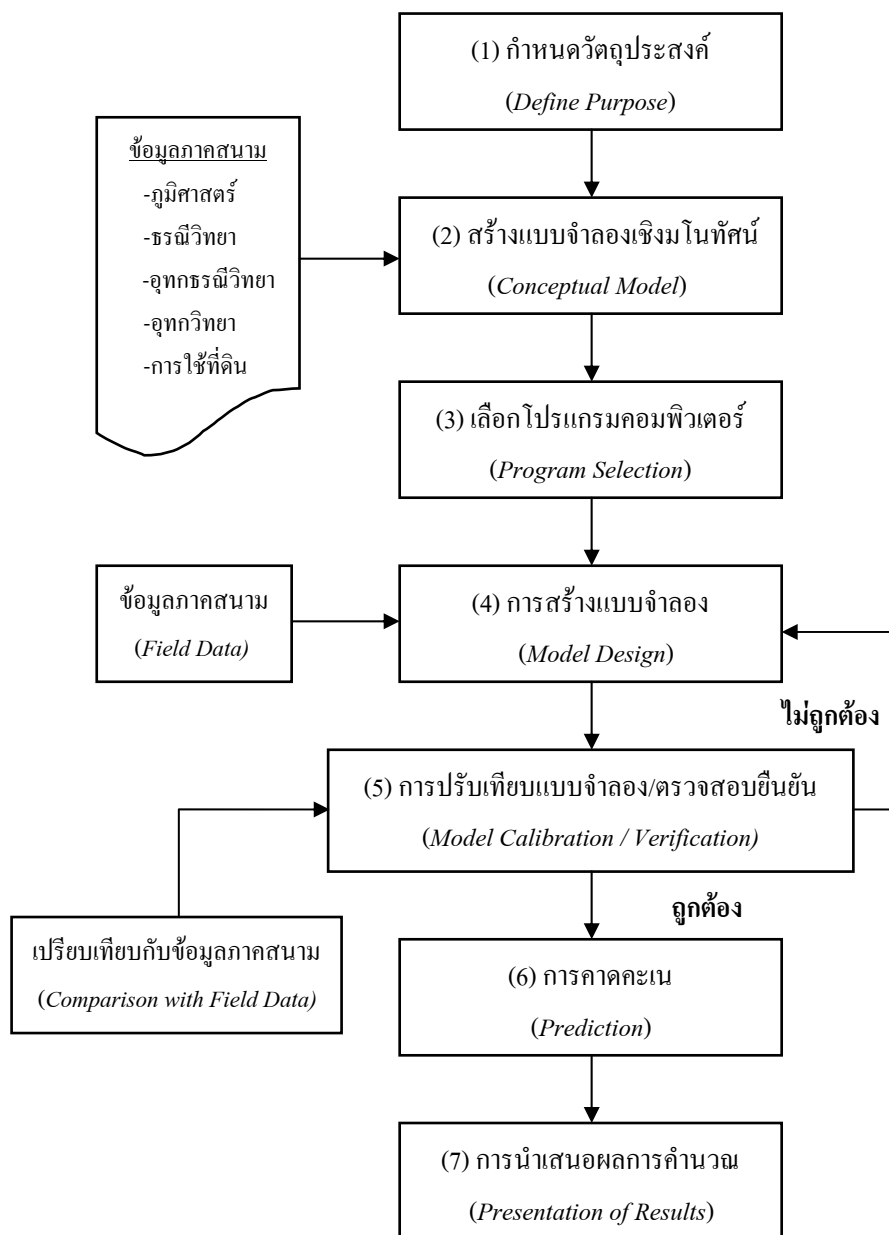
เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดสอบมีจำกัด ดังนั้นจึงสามารถสูบน้ำทดสอบเพียง 1 บ่อคือ บ่อ OW-1 บ้านโลกเมือง ต.บางเหริยง อ.ควนเนียง จ.สงขลา โดยสูบน้ำทดสอบแบบบ่อเดี่ยว (Single well) การสูบน้ำทดสอบจะทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชม. พร้อมทำการวัดระยะน้ำลดและหลังหยุดสูบน้ำทำการวัดระยะน้ำคืนตัวอีก 24 ชม. การศึกษาจะใช้วิธีการสูบน้ำทดสอบด้วยอัตราคงที่ (Constant Rate Test หรือ Drawdown-Recovery Test) ส่วนการวิเคราะห์คุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำใช้วิธีของ Theis & Jacob Recovery Test ผลการสูบน้ำทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.5 (รายละเอียดการวิเคราะห์และภาพการทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์การสูบน้ำทดสอบแบบบ่อเดี่ยว (Single well)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	สถานี	ตำบล	อำเภอ	ชั้นน้ำ	คุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำ	
						T(m ² /day)	K(m/sec)
1	OW-1	วัดโลกเมือง	บางเหริยง	ควนเนียง	คองหงส์	5.688	4.38E-06

บทที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การจัดทำแบบจำลองเพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ระบบสมมูลน้ำบาดาล การไหลของน้ำ และวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของความเค็มที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำบาดาล แบ่งขั้นตอนการจัดทำ ออกเป็น 7 ขั้นตอนดังรูปที่ 5.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ดัดแปลงจาก Anderson and Woessner, 1991)

5.1 กำหนดวัตถุประสงค์ (Define Purpose)

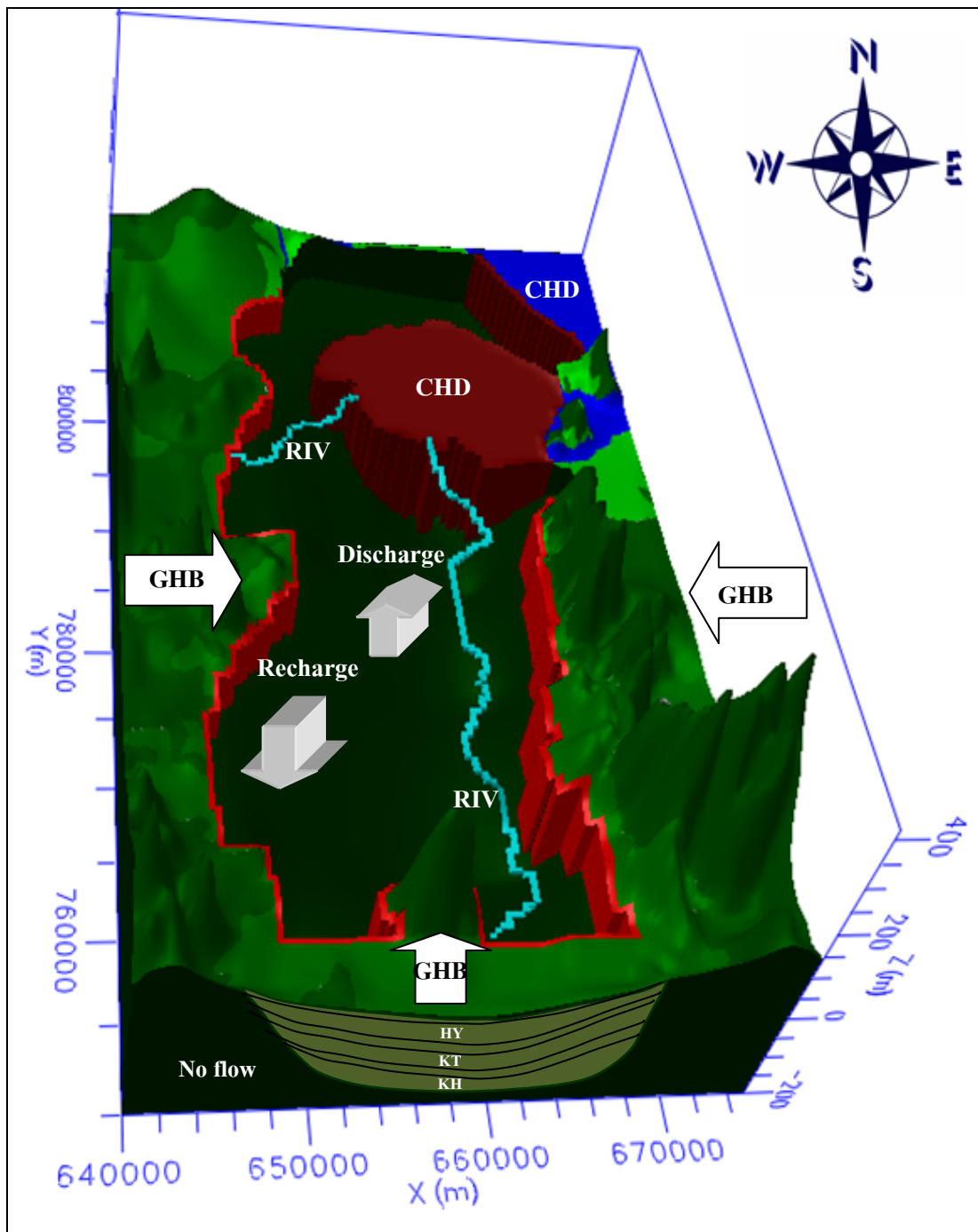
วัตถุประสงค์ของการจัดทำแบบจำลองเพื่อ

- ศึกษาการไหลความสมดุลของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ให้ทราบถึงปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบ และไหลออกจากระบบตามธรรมชาติในแต่ละปี
- ศึกษาการแพร่กระจายของน้ำเค็ม เพื่อคาดการณ์การรุกคืบของน้ำเค็มในอนาคต
- ประเมินศักยภาพน้ำบาดาล และเพื่อกำหนดปริมาณการสูบน้ำสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการรุกคืบของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

5.2 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model)

แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ คือบทสรุปความเข้าใจของลักษณะทางกายภาพ และระบบการไหลของน้ำบาดาลของพื้นที่ศึกษา จากการวิเคราะห์ข้อมูลของพื้นที่ศึกษาซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลธรณีวิทยา ธรณีสัณฐาน อุทกธรณีวิทยา อุทกวิทยา สภาพภูมิประเทศ การใช้น้ำบาดาล สภาพดินและการใช้ที่ดิน ผลที่ได้เป็นข้อมูลเชิงตัวเลข แผนที่ และภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา ซึ่งจะนำไปใช้ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและตรวจสอบผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ความซับซ้อนของลักษณะธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยาในแอ่งหาดใหญ่ สามารถสรุปเป็นแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual model) ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.2

แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของแอ่งหาดใหญ่สามารถแบ่งออกเป็น 6 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นน้ำหาดใหญ่ ชั้นน้ำคูเต่าและชั้นน้ำคองหงส์ ตามลำดับและ ชั้นหินกั้นน้ำ (Aquitard) 3 ชั้น กั้นระหว่างชั้นหินอุ้มน้ำ ชั้นล่างสุดพิจารณาให้ไม่มีการซึมผ่านของน้ำในแนวตั้ง (No flow boundary) ส่วนทางทิศเหนือของแอ่ง (ทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย) พิจารณาให้เป็นขอบเขตระดับน้ำใต้ดินคงที่ตลอดเวลา (Constant head boundary) ขอบแอ่งด้านทิศตะวันตกและตะวันออกกำหนดให้เป็นขอบเขตที่มีน้ำไหลผ่าน (General head boundary) จากเทือกเขาบรรทัดและคองหงส์ ตามลำดับ คลองอุ้ต๊ะเกาะซึ่งไหลผ่านแอ่งหาดใหญ่จากทางทิศใต้ไปทางทิศเหนือ พิจารณาให้เป็นขอบเขตแม่น้ำ (River boundary) ส่วนพื้นผิวดินบนแอ่ง พิจารณาให้น้ำสามารถซึมผ่านลงไปได้ โดยกำหนดให้เป็นพื้นที่รับน้ำ (Recharge boundary) ทั้งนี้ในการจำลองระบบอุทกธรณีวิทยาได้ตั้งสมมติฐานในการจำลองเชิงตัวเลขดังนี้



คำอธิบาย

HY = ชั้นน้ำบาดาลใหญ่

KT = ชั้นน้ำคูเต่า

KH = ชั้นน้ำคองหัง

CHD = ขอบเขตระดับน้ำคงที่ (Constant head boundary)

GHB = ขอบเขตน้ำไหลผ่าน (General head boundary)

RIV = ขอบเขตแม่น้ำ (River boundary)

รูปที่ 5.2 แบบจำลองเชิงมิติของแอ่งน้ำของแอ่งน้ำขนาดใหญ่

- 1) ชั้นหินอุ้มน้ำแต่ละชั้นมีคุณสมบัติเป็น Homogeneous and Anisotropy
- 2) ชั้นหินอุ้มน้ำในแอ่งขนาดใหญ่เป็นชั้นหินร่วน (Unconsolidated aquifer)
- 3) กรณีจำลองการไหล กำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำคงที่ (Constant density)
- 4) กรณีจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม กำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Variable density) นั่นคือความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของน้ำจืดและน้ำเค็มมีผลต่อแบบจำลอง

5.3 เลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Program Selection)

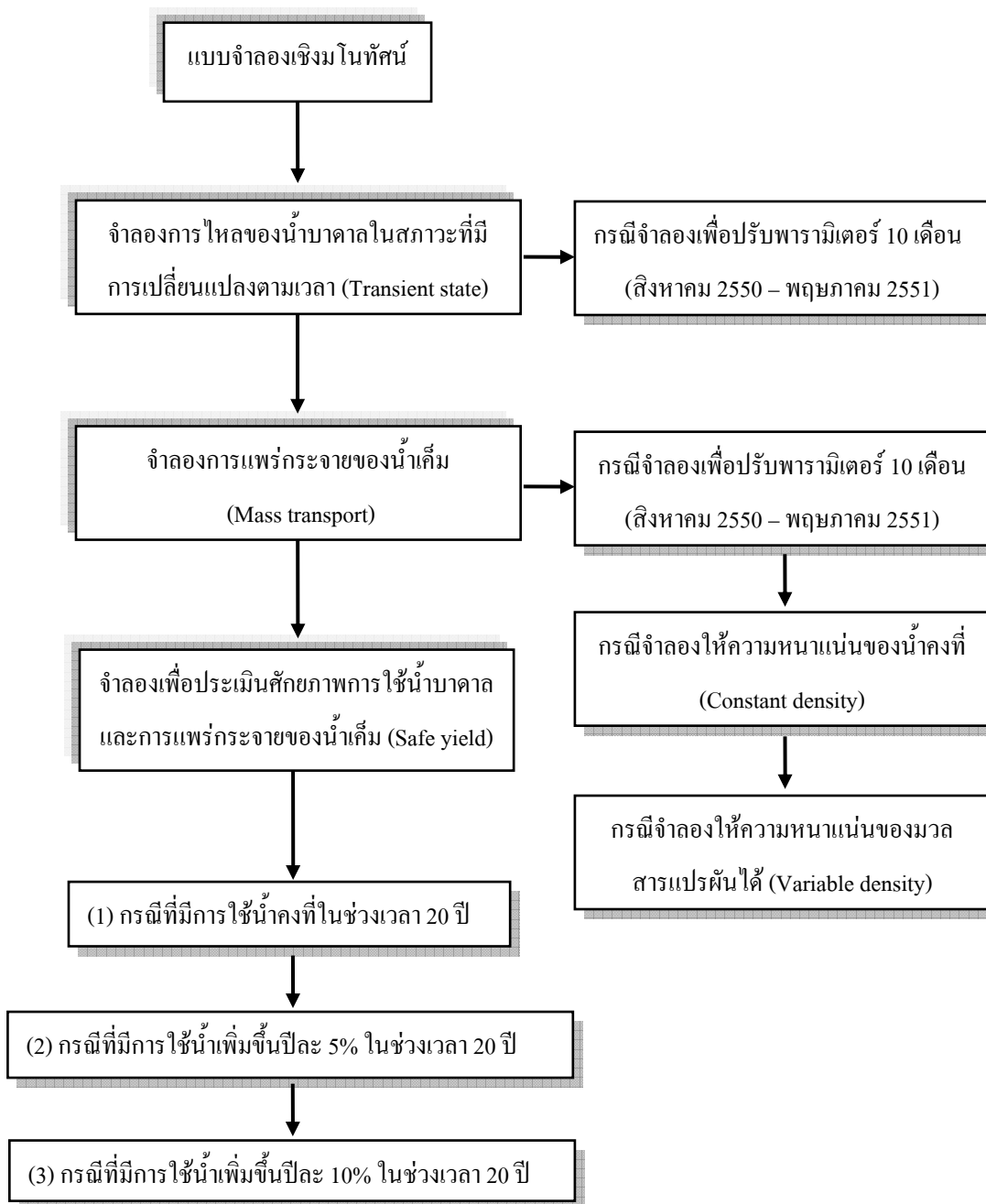
โปรแกรมที่นำมาสร้างแบบจำลองน้ำบาดาลในการศึกษานี้ใช้โปรแกรม Visual MODFLOW Version 4.1 Pro พัฒนาโดยบริษัท Waterloo Hydrogeologic, Inc. จากประเทศแคนาดา โปรแกรมนี้ประกอบด้วยโปรแกรม MODFLOW-2000, MODPATH, MT3DMS, RT3D, Stream Routing Package, WinPEST, SEAWAT และ VMOD 3D-Explerer ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการศึกษาตามวัตถุประสงค์ดังที่กล่าวมา

5.4 การสร้างแบบจำลอง (Model Design)

ในการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาได้แบ่งการจำลองออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ การจำลองการไหลสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient state flow) การจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม (Mass transport) และการจำลองเพื่อประเมินศักยภาพการใช้น้ำบาดาล (Groundwater potential assessment) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 การสร้างแบบจำลองมีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.4.1 การออกแบบกริด (Grid Design)

การออกแบบกริดโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับข้อมูลที่มีอยู่ และวัตถุประสงค์ของแบบจำลองนั้นๆ เช่น การจำลองเพื่อวางแผนการจัดการน้ำใต้ดินในระดับภูมิภาค ซึ่งมีพื้นที่ 500 ตารางกิโลเมตร ก็อาจเลือกใช้ขนาดของกริดเท่ากับ 1 ตารางกิโลเมตร เพราะจะทำให้ผลการคำนวณเชื่อถือได้ในระดับวางแผน แต่ในการจำลองเพื่อคำนวณการไหลระหว่างบ่อ ในพื้นที่ที่มีบ่อน้ำหนาแน่นจำเป็นต้องใช้ขนาดของกริดเล็กลงเป็น 200 ถึง 300 ตารางเมตรแทนจึงจะให้ผลการจำลอง



รูปที่ 5.3 กรณีจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของน้ำเค็ม

ที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยที่ความกว้างของกริดที่ติดต่อกันไม่ควรต่างกันเกิน 1.5 เท่าของกริดข้างเคียง เพื่อไม่ให้เกิดผลการคำนวณที่ผิดพลาดมาก (Domenico and Schwartz, 1998) ในกรณีที่ใช้ขนาดของกริดเล็กเกินความจำเป็น จะทำให้ใช้เวลานานในการปรับเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลอง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการคำนวณแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ของแบบจำลอง

ดังนั้นจึงควรเลือกใช้กริดที่มีขนาดเหมาะสมกับลักษณะของงาน และสภาพทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ เพื่อความถูกต้องและประหยัดเวลา

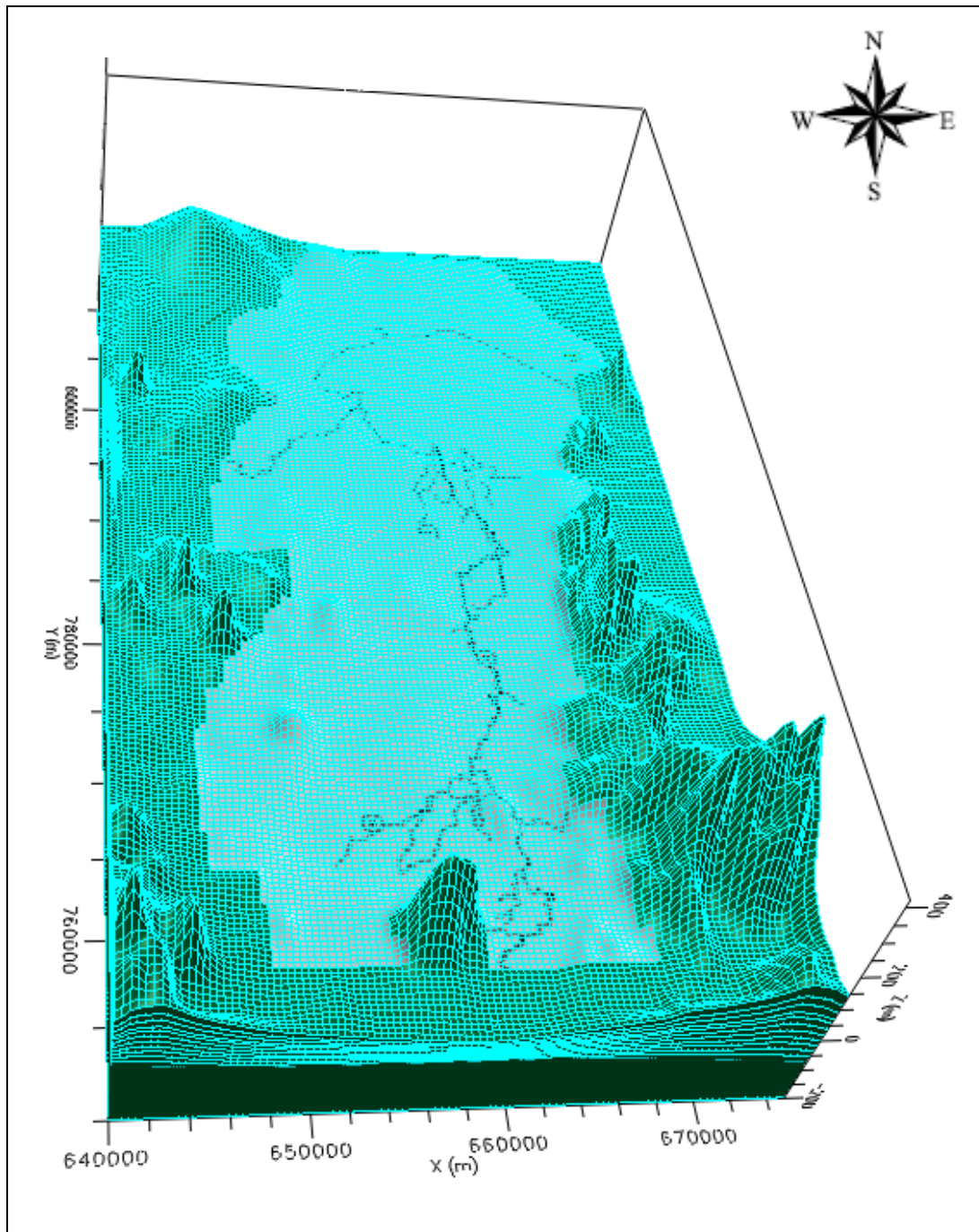
พื้นที่ในการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแอ่งหาคใหญ่มีขนาด 1,260 ตารางกิโลเมตร มีความกว้าง 35 กิโลเมตร ตามแนวตะวันออก-ตะวันตก จากพิกัด UTM 640,000-675,000E มีความยาว 60 กิโลเมตร ตามแนวเหนือ-ใต้ จากพิกัด UTM 750,000-810,000N และมีความสูงของระดับภูมิประเทศตั้งแต่ -180 เมตร จนถึง 390 เมตร (รทก.) (รูปที่ 5.4) ในการจำลองได้แบ่งพื้นที่แบบจำลองเป็นกริดบล็อกขนาดเล็ก โดยแบ่งแนวตะวันออก-ตะวันตกเป็น 100 สดมภ์ แนวเหนือ-ใต้เป็น 200 แถว และแบ่งความสูงของพื้นที่เป็น 12 ชั้น รวมทั้งหมด 240,000 กริดบล็อก ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.1

5.4.2 การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง (Boundary Condition)

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

5.4.3 สภาพขอบเขตและช่วงเวลาการคำนวณ (Time Step and Stress Period)

ช่วงเวลาของการจำลองเป็นตัวกำหนดระยะเวลาของการจำลองและพารามิเตอร์ที่จะนำเข้าแบบจำลอง ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดช่วงเวลาการคำนวณเป็นรายเดือนจำนวน 84 เดือน ส่วนขั้นเวลาการคำนวณซึ่งเป็นเวลาย่อยของช่วงเวลา กำหนดให้ 1 ช่วงเวลาของการคำนวณมี 5 ขั้น เวลาการคำนวณ คิดเป็น 420 ช่วงเวลา (Time step) จำนวนวันจำลองเท่ากับ 2,555 วัน (พ.ศ. 2545-2551) จะได้ว่าใช้เวลา 1 ขั้น (Stress period) ประมาณ 6 วัน



คำอธิบาย

Column (E-W) = 100 สดมภ์ ($\Delta x = 350$ m.) Row (N-S) = 200 แถว ($\Delta y = 300$ m.)

Layers = 12 ชั้น ($\Delta z = 5-20$ m.) ระดับภูมิประเทศสูงสุด 390 เมตร (รทก.)

ระดับภูมิประเทศต่ำสุด -180 เมตร (รทก.) รวมทั้งหมด 24,000 กริดบล็อก

รูปที่ 5.4 การออกแบบกริดแบบจำลอง

ตารางที่ 5.1 การกำหนดรายละเอียดของแบบจำลอง

รายการกำหนด	ค่ากำหนดในแบบจำลอง
1) ขนาดแบบจำลองในพื้นที่ศึกษา	
ความกว้างพิกัด UTM ตะวันออก	640,000 - 675,000 m.
ความสูงพิกัด UTM เหนือ	750,000 - 810,000 m.
ระดับภูมิประเทศ (รทก.)	-200 ถึง + 390 m.
2) ขนาดความละเอียดของแบบจำลอง	
ขนาด grid cell ตามความกว้าง (E-W)	350 m.
ขนาด grid cell ตามความยาว (N-S)	300 m.
จำนวนสดมภ์ (Column)	100 ช่อง
จำนวนแถว (Row)	200 ช่อง
จำนวนชั้น (Layer)	13 ชั้น
จำนวนกริดบล็อกละในแต่ละชั้น	20,000 กริดบล็อก
3) การจัดแบ่งชั้นในแบบจำลอง	
ชั้นดินเหนียว (Aquitard)	ชั้นที่ 1, 5, 9
ชั้นน้ำบาดาลใหญ่ (Hat Yai aquifer)	ชั้นที่ 2, 3, 4
ชั้นน้ำคู้เต่า (Ku tao aquifer)	ชั้นที่ 6, 7, 8
ชั้นน้ำค้อหงส์ (Kor Hong aquifer)	ชั้นที่ 10, 11, 12
4) หน่วยที่ใช้ในแบบจำลอง (ระบบเมตริก)	
ระยะทาง – Length	เมตร – meters
เวลา - Time	วัน – day
ความนำชลศาสตร์ – 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 มกราคม 2545
วันที่เทียบเคียงในแบบจำลองเริ่มต้น (1 มกราคม 2545)	0
วันที่เทียบเคียงในแบบจำลองสิ้นสุด (31 ธันวาคม 2569)	9,125
6) จำนวนบ่อบาดาล	
บ่อบาดาล	205 บ่อ
บ่อสังเกตการณ์	47 บ่อ

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดการกำหนดขอบเขตแบบจำลอง (Boundary Condition)

ขอบเขตแบบจำลอง	รายละเอียด
1) ขอบเขตระดับน้ำคงที่ (Constant head boundary)	กำหนดให้ระดับน้ำคงที่ตลอดเวลา (0 ม. รทก.)
2) ขอบเขตแม่น้ำ (River boundary) -ระดับน้ำและระดับท้องน้ำ -ความหนาตะกอนท้องน้ำ -ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตะกอนท้องน้ำ, Kz -ความกว้างลำน้ำ -ความยาวลำน้ำ -ค่าความนำของน้ำผ่านตะกอนท้องน้ำ	ใช้ข้อมูลจากสถานีวัดน้ำท่าลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาและลุ่มน้ำคลองรัตภูมิ กรมชลประทาน 6 สถานี ได้แก่ X67, X194, X181, X44, X90 และ X173a (ข้อมูลสถานีวัดน้ำแสดงไว้ในภาคผนวก ข) ใช้ข้อมูลเฉลี่ยรายเดือน (ช่วงข้อมูล 2547-2550) ของแต่ละสถานี ใช้ค่าเฉลี่ยประมาณ 0.50 ม. เนื่องจากตะกอนท้องน้ำของคลองอู่ตะเภาและคลองรัตภูมิมิมีลักษณะเป็นตะกอนดินเหนียวปนทราย จึงกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเท่ากับ $1e-06$ m/s ใช้ค่าเฉลี่ยประมาณ 50 ม. กำหนดอัตโนมัติด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW Version 4.1 คำนวณอัตโนมัติด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW Version 4.1
3) ขอบเขตการเพิ่มเติมน้ำ (Recharge boundary)	คิดประเมินเป็น 1- 12% ของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี (จากการประเมินในหัวข้อ 3.1.2) ตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดชั้นหินอุ้มน้ำ และความลาดชันของพื้นที่ โดยกำหนดเฉพาะชั้นที่ 1 ของแบบจำลอง
4) ขอบเขตน้ำไหลผ่าน (General head boundary) -ระดับน้ำ -ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน -ค่าความนำของน้ำผ่านตะกอนท้องน้ำ	กำหนดให้มีน้ำไหลจากพื้นที่รับน้ำทางด้านทิศตะวันตก ทิศตะวันออกและทิศใต้ของพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลแผนที่ระดับน้ำกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2546) ช่วงข้อมูล 5 –25 ม.(รทก.) เนื่องจากบริเวณขอบแอ่งมีลักษณะเป็นกรวด ทราย รวมถึงพิจารณาให้ไหลจากรอยแยกของหิน จึงกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเฉลี่ยเท่ากับ $4.50e-03$ m/s คำนวณอัตโนมัติด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW Version 4.1
5) ขอบเขตความเข้มข้นคงที่ (Constant concentration)	กำหนดให้ค่าความเข้มข้นคงที่ตลอดเวลาเท่ากับ 16,000 mg/L ที่ทะเลสาบสงขลาและ เท่ากับ 18,000 mg/L ที่ทะเลอ่าวไทย ตามลำดับ

5.5 การจำลองการไหลในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient State Flow)

การจำลองการไหลแบบผันแปรตามเวลา เป็นการจำลองที่มีความสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ทั้งนี้เพราะเป็นการจำลองตามต้นทุนน้ำที่ขึ้นอยู่กับฤดูกาล นอกจากนี้ยังสามารถใช้จำลองการสูบน้ำเพื่อประเมินศักยภาพน้ำบาดาล (Groundwater potential assessment) ในอนาคตได้ ข้อมูลที่นำเข้าแบบจำลองมีรายละเอียดต่อไปนี้

5.5.1 อัตราการเติมน้ำ (Recharge Rate)

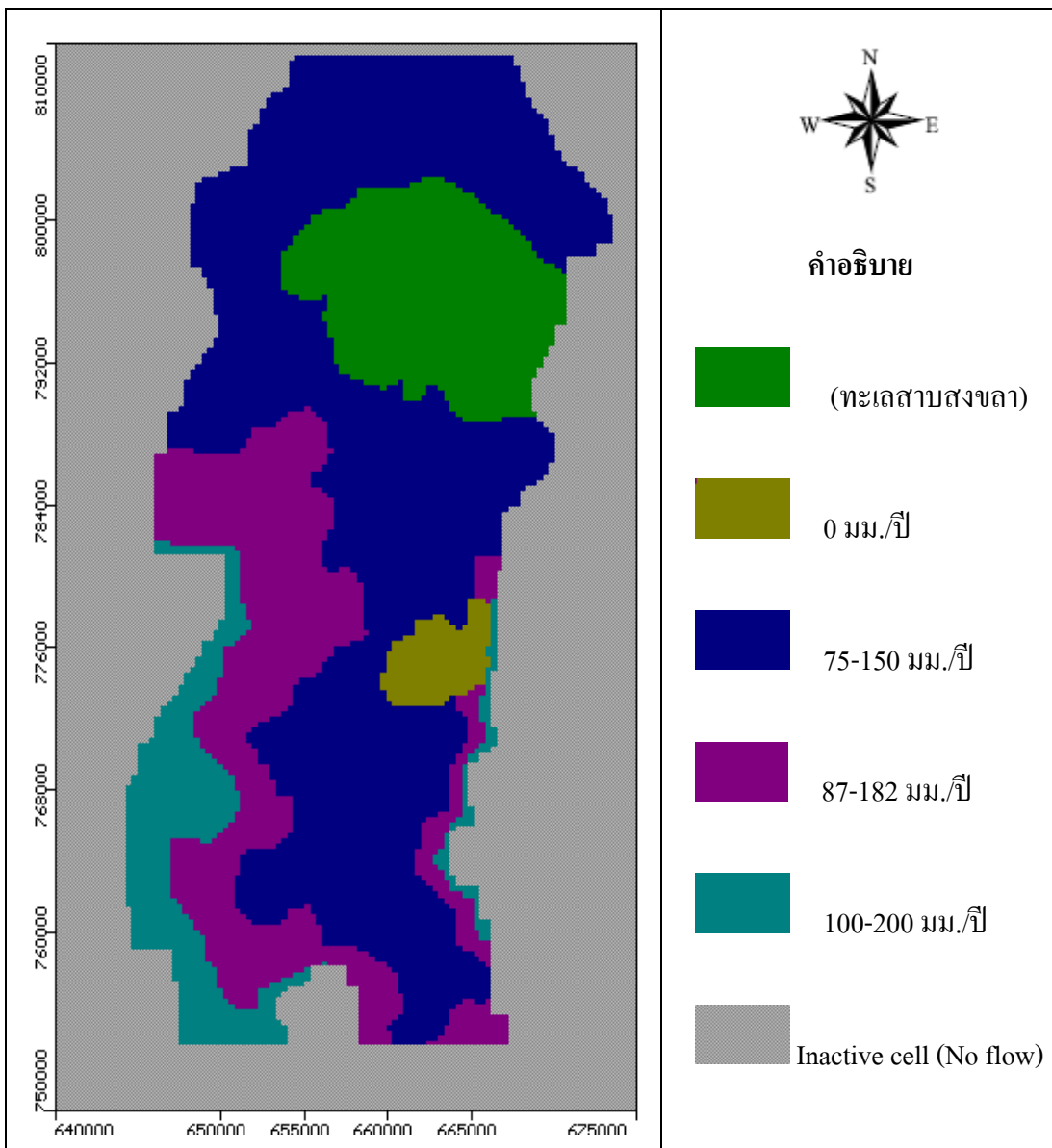
พิจารณาจากปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มเติม น้ำ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อัตราการระเหย ปริมาณน้ำท่า ลักษณะของดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน และความสูงต่ำของภูมิประเทศ เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาพิจารณาร่วมกัน และทำการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ในการจำลองจะได้พื้นที่เพิ่มเติม น้ำ 4 โซน (รูปที่ 5.5) โดยได้แจกแจงอัตราการเพิ่มเติม น้ำให้อยู่ในช่วงที่ฝนตกชุก คือ เดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม โดยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝน และอัตราการคายระเหยในช่วงเวลานั้น ปริมาณการเพิ่มเติม น้ำที่แจกแจงสำหรับนำเข้าแบบจำลองแสดงในตาราง 5.3

5.5.2 คุณสมบัติทางชลศาสตร์

คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage coefficient) และความพรุน (Porosity) ซึ่งได้จากการสุบทดสอบในสนามและจากรายงานการศึกษาศักยภาพน้ำบาดาลในกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2546) (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ค) มาพิจารณาประกอบกัน กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวตั้งต่อแนวราบ เท่ากับ 1:10 ผลจากการปรับค่าตัวแปรในสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในตารางที่ 5.4

5.5.3 ระดับแรงดันน้ำเริ่มต้น (Initial Head)

ระดับน้ำเริ่มต้นที่ใช้ในการจำลองใช้ค่าระดับแรงดันน้ำเฉลี่ยตั้งแต่ พ.ศ. 2545-2551 (ได้จากการวัดในภาคสนามและข้อมูลระดับน้ำ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล)



รูปที่ 5.5 อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธีสู่แหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา

5.5.4 การใช้ น้ำบาดาล (Groundwater Usage)

การประเมินการใช้ น้ำบาดาล (หัวข้อ 3.3) พบว่า พื้นที่ศึกษามีอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยประมาณ 68,570 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (25.03 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี) ตำแหน่งบ่อบาดาลและบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.3 ปริมาณการเพิ่มเติมน้ำการจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

เดือน	ปริมาณการเพิ่มเติมน้ำ (มิลลิเมตร/ปี)		
	พื้นที่ที่มีค่าการซึมผ่านต่ำ	พื้นที่ที่มีค่าการซึมผ่านปานกลาง	พื้นที่ที่มีค่าการซึมผ่านเร็ว
มกราคม	0	0	0
กุมภาพันธ์	0	0	0
มีนาคม	0	0	0
เมษายน	0	0	0
พฤษภาคม	0	0	0
มิถุนายน	0	0	0
กรกฎาคม	0	0	0
สิงหาคม	0	0	0
กันยายน	0	0	0
ตุลาคม	75	87	100
พฤศจิกายน	150	182	200
ธันวาคม	110	135	150

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์ของชั้นน้ำที่ได้จากการปรับเทียบ (Calibrated parameters)

ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifers)	Hydraulic conductivity			Storage		Porosity	
	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	Ss (1/m)	Sy (-)	Eff. Por.	Tot. Por.
ดินเหนียว	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	0.02	0.03	0.03	0.42
ชั้นน้ำบาดใหญ่	5.67E-05	5.67E-05	5.67E-06	0.00049	0.25	0.27	0.39
ชั้นน้ำคูเต่า	4.75E-05	4.75E-05	4.75E-06	0.0002	0.20	0.24	0.32
ชั้นน้ำคองส์	2.32E-05	2.32E-05	2.32E-06	0.0001	0.20	0.25	0.30

หมายเหตุ

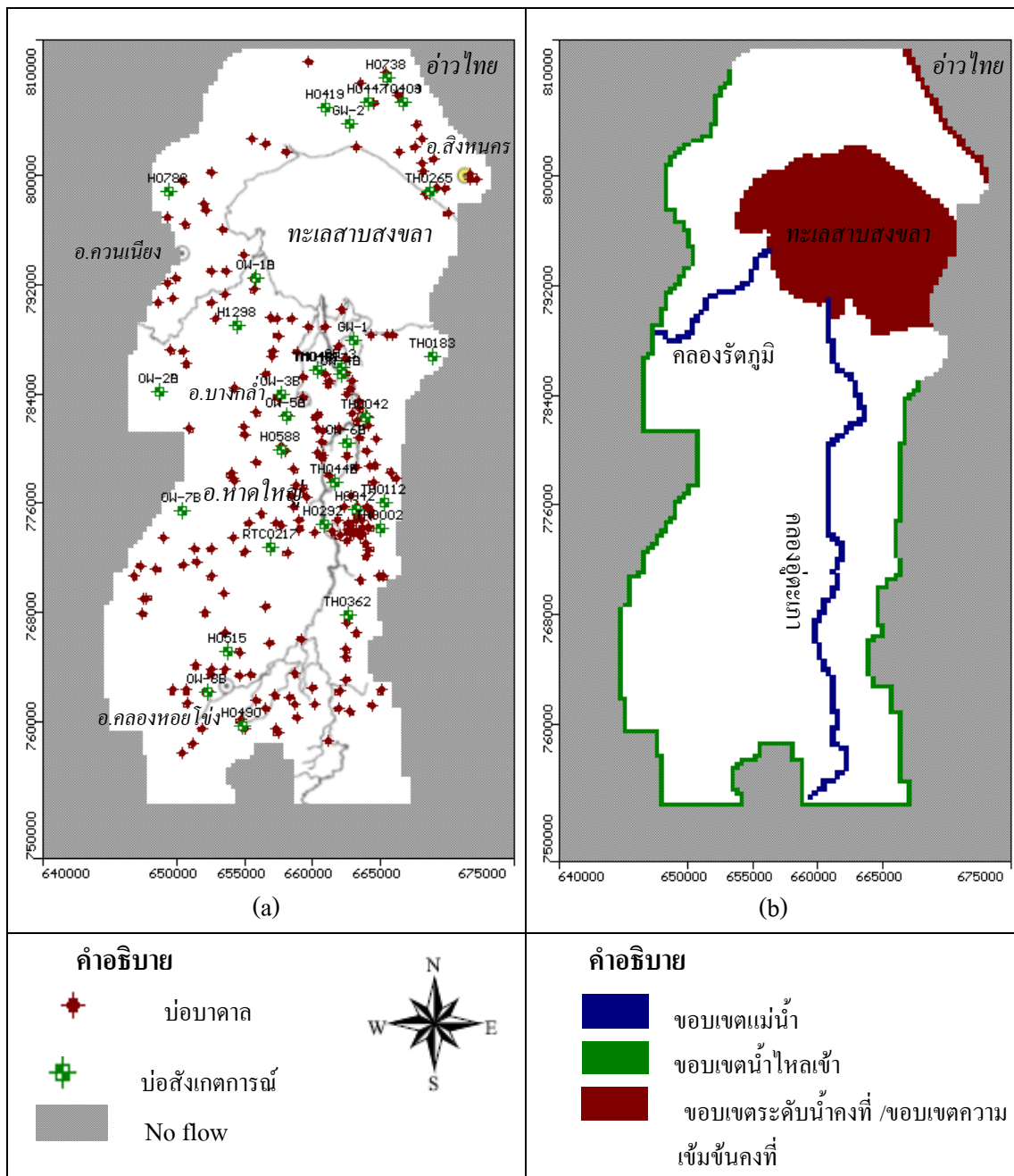
Kx, Ky และ Kz = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ ในแนวแกน x, y และ z (แนวดิ่ง)

Ss = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะ

Sy = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน

Eff. Por = Effective Porosity

Tot. Por = Total Porosity



รูปที่ 5.6 ตำแหน่งบ่อบาดาลและขอบเขตของแบบจำลอง (a) บ่อบาดาลและบ่อสังเกตการณ์ (b) การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง

5.6 การจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม (Mass Transport Modeling)

การจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม ได้จำลองในช่วงเวลาที่มีการตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาลเดือนสิงหาคม 2550 ถึง เดือนพฤษภาคม 2551 แล้วทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์

โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้ให้สอดคล้องกับปริมาณคลอไรด์ที่วัดได้ในสนาม 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)

ความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นที่ใช้ในการจำลองใช้ค่าปริมาณคลอไรด์เฉลี่ยที่ได้จากการวัดในภาคสนามตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2550 ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2551 (แสดงไว้ในภาคผนวก ง)

5.6.2 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำ (Dispersivity, α)

ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวราบและแนวตั้ง โดยอ้างอิงจากชนิดของหินที่ได้มีการการศึกษาของ 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
ชั้นน้ำบาดใหญ่	15
ชั้นน้ำคูเต่า	12
ชั้นน้ำคองหงส์	10

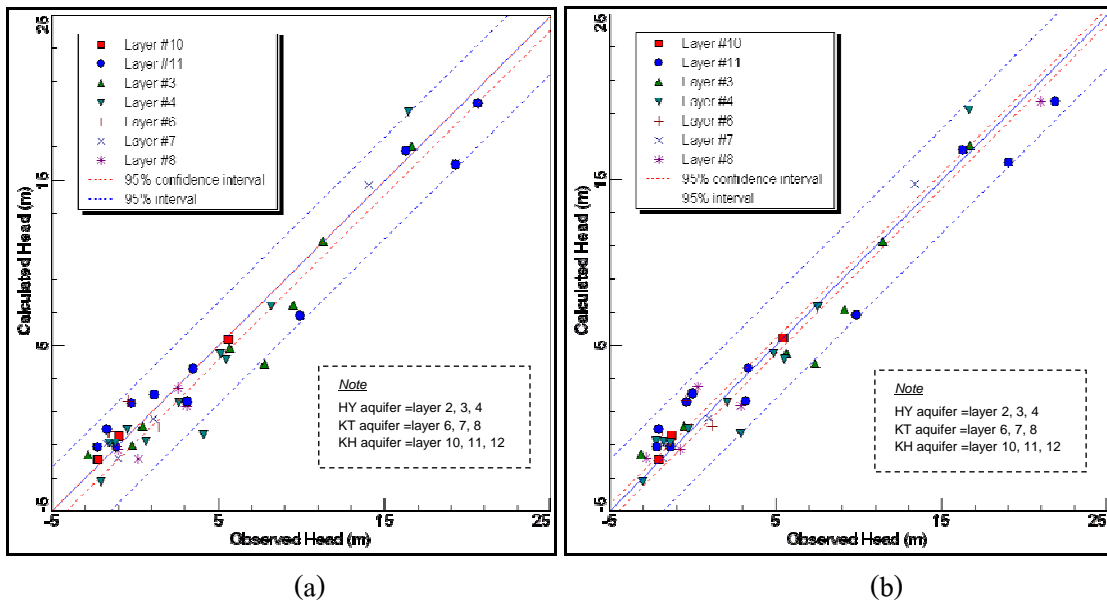
5.7 การปรับเทียบและตรวจสอบยืนยันแบบจำลอง (Model Calibration and Verification)

การปรับเทียบค่าตัวแปร เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน อัตราการเติมน้ำ และสัมประสิทธิ์การกักเก็บ มีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ผลการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในสนามสอดคล้องกัน ณ สถานที่และเวลานั้นๆ ซึ่งการปรับแก้ค่าตัวแปรจะเป็นในลักษณะลองผิดลองถูก (Trial-and-error adjustment) จนกระทั่งทราบขอบเขตและช่วงค่าของตัวแปรต่างๆ เพื่อตรวจสอบแบบจำลอง เมื่อมีการปรับค่าตัวแปรจนแบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่ดีแล้ว ต้องดำเนินการตรวจสอบยืนยันอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้ข้อมูลภาคสนามอีกชุดหนึ่งที่แตกต่างจากข้อมูลชุดแรกที่ใช้ในการปรับแก้ค่าตัวแปรเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองให้มีความถูกต้องและสามารถนำมาใช้งานได้

5.7.1 การไหลในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในการจำลองแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่นำเข้าแบบจำลอง จนค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณและที่วัดได้ในสนามอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ พารามิเตอร์ที่มีการปรับค่าได้แก่ อัตราการเพิ่มเติมน้ำ (ตารางที่ 5.3) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ (ตารางที่ 5.4) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ตั้งเกณฑ์ความแตกต่างของระดับน้ำด้วยความเบี่ยงเบนคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) ไว้ที่ร้อยละ 10 นั่นคือถ้าผลต่างระดับน้ำที่คำนวณได้กับที่วัดได้ในสนามมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ถือว่าผลการจำลองนั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ผลการปรับเทียบแบบจำลองในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่มีความน่าเชื่อถือยอมรับได้ได้แสดงในรูปที่ 5.7 และสรุปผลการปรับเทียบได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.6

ส่วนในการตรวจสอบยืนยันแบบจำลอง (Model verification) นั้น พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณและที่วัดได้ในสนามจากบ่อสังเกตการณ์จำนวน 27 บ่อ (รูปที่ 5.8) ในช่วงเวลา 7 ปี (พ.ศ.2545-2551) พบว่าระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันและผลต่างระดับน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ถือว่าผลการจำลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

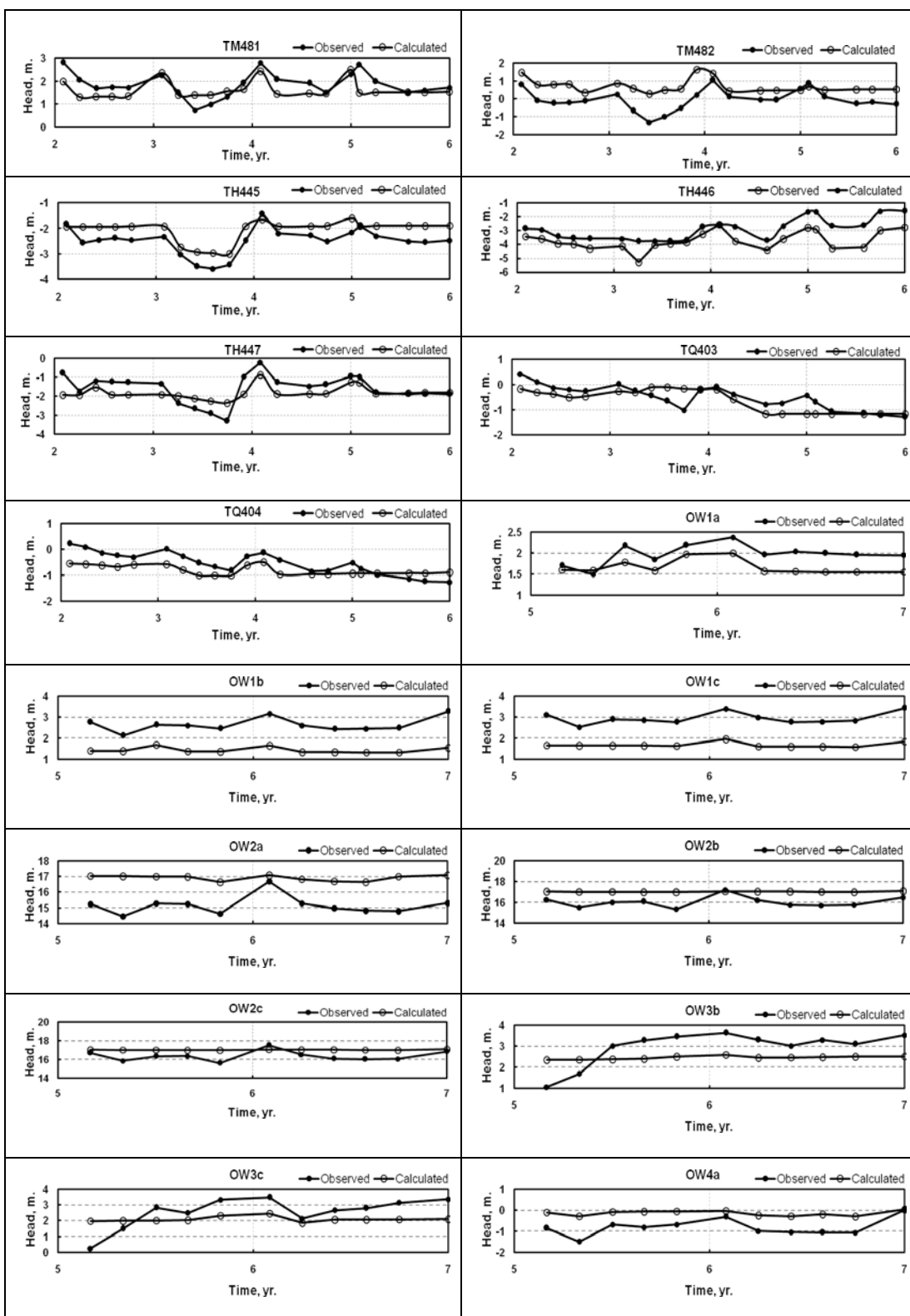


รูปที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (a) ปีที่ 6 (พ.ศ.2550) (b) ปีที่ 7 (พ.ศ.2551)

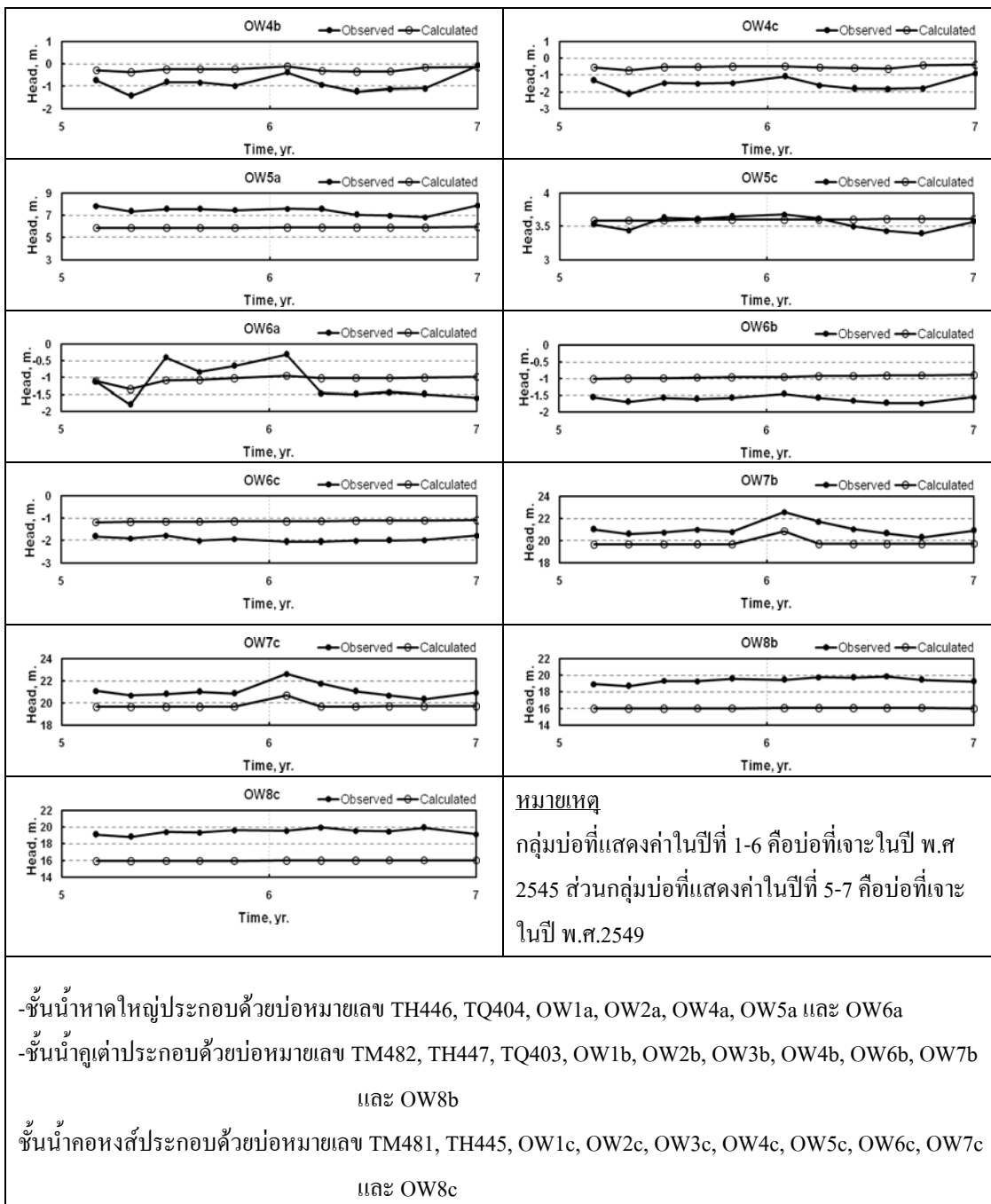
ตารางที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

Calibrated value	Time	
	ปีที่ 6 (พ.ศ.2550)	ปีที่ 7 (พ.ศ.2551)
Standard error of the estimate, m	0.224	0.227
Root mean squared, m	1.582	1.544
Normalized RMS, %	6.770	6.199

ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน พิจารณาช่วงที่มีการตรวจวัดระดับน้ำ (สิงหาคม 2550-พฤษภาคม 2551) พบว่า ปีที่ 6 (2550) ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 6.770 และ ปีที่ 7 (2551) ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 6.199 ไม่เกินร้อยละ 10 นั่นคือ แบบจำลองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบระดับน้ำที่วัดได้ในสนามกับค่าที่คำนวณจากแบบจำลอง (พ.ศ.2545-2551)



รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบระดับน้ำที่วัดได้ในสนามกับค่าที่คำนวณจากแบบจำลอง (พ.ศ.2545-2551)

(ต่อ)

5.7.2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม

ในการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม ได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่นำเข้ามาแบบจำลองจนปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณและที่วัดได้ในสนามอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ พารามิเตอร์ที่มีการปรับค่าได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำ (Dispersivity) โดยตั้งเกณฑ์ความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ด้วยค่าความเบี่ยงเบนคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) ไว้ที่ร้อยละ 10 นั่นคือถ้าผลต่างปริมาณคลอไรด์ที่คำนวณได้กับที่วัดได้ในสนามมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ถือว่าผลการจำลองนั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

1) กรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ (Constant density)

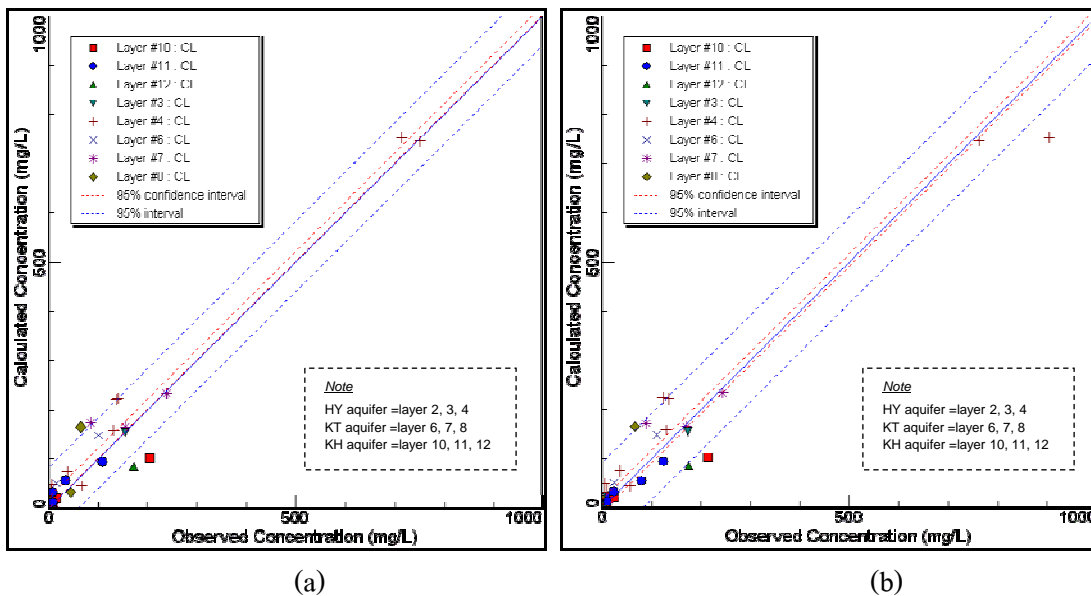
ผลการปรับเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ พิจารณาช่วงที่มีการตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาล (สิงหาคม 2550-พฤษภาคม 2551) พบว่าปีที่ 6 (2550) ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 4.937 และปีที่ 7 (2551) ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 4.839 แสดงว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2) กรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Variable density)

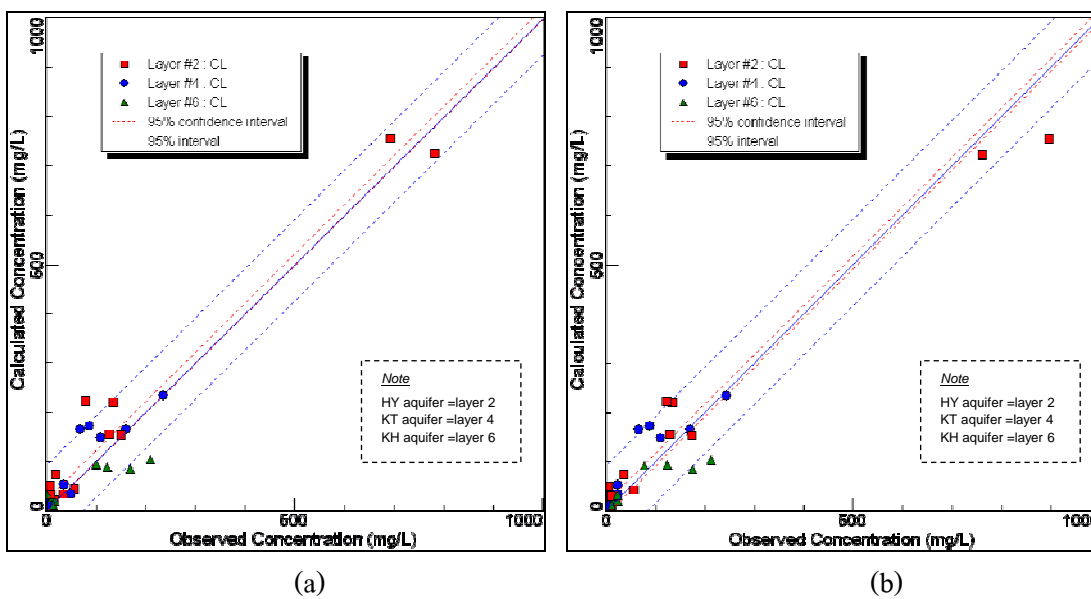
ผลการปรับเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ พิจารณาเช่นเดียวกับกรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ พบว่าปีที่ 6 (2550) ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 5.039 และปีที่ 7 (2551) ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 4.813 แสดงว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ผลการปรับเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มทั้ง 2 กรณีแสดงไว้ในรูปที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ และสรุปค่าที่ปรับเทียบค่าแล้วแสดงไว้ในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ผลการปรับเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม

Calibrated value	Constant density		Variable density	
	ปีที่ 6 (พ.ศ.2550)	ปีที่ 7 (พ.ศ.2551)	ปีที่ 6 (พ.ศ.2550)	ปีที่ 7 (พ.ศ.2551)
Standard error of the estimate, mg/L	5.180	6.409	5.306	6.307
Root mean squared, mg/L	36.977	43.640	37.765	42.981
Normalized RMS, %	4.937	4.839	5.039	4.813



รูปที่ 5.9 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ (a) ปีที่ 6 (พ.ศ.2550) (b) ปีที่ 7 (พ.ศ.2551)



รูปที่ 5.10 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (a) ปีที่ 6 (พ.ศ.2550) (b) ปีที่ 7 (พ.ศ.2551)

5.8 ผลการจำลอง

ผลการจำลองประกอบด้วย การไหลในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา และการแพร่กระจายของน้ำเค็ม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.8.1 การไหลในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

5.8.1-1 ทิศทางการไหลของน้ำบาดาล

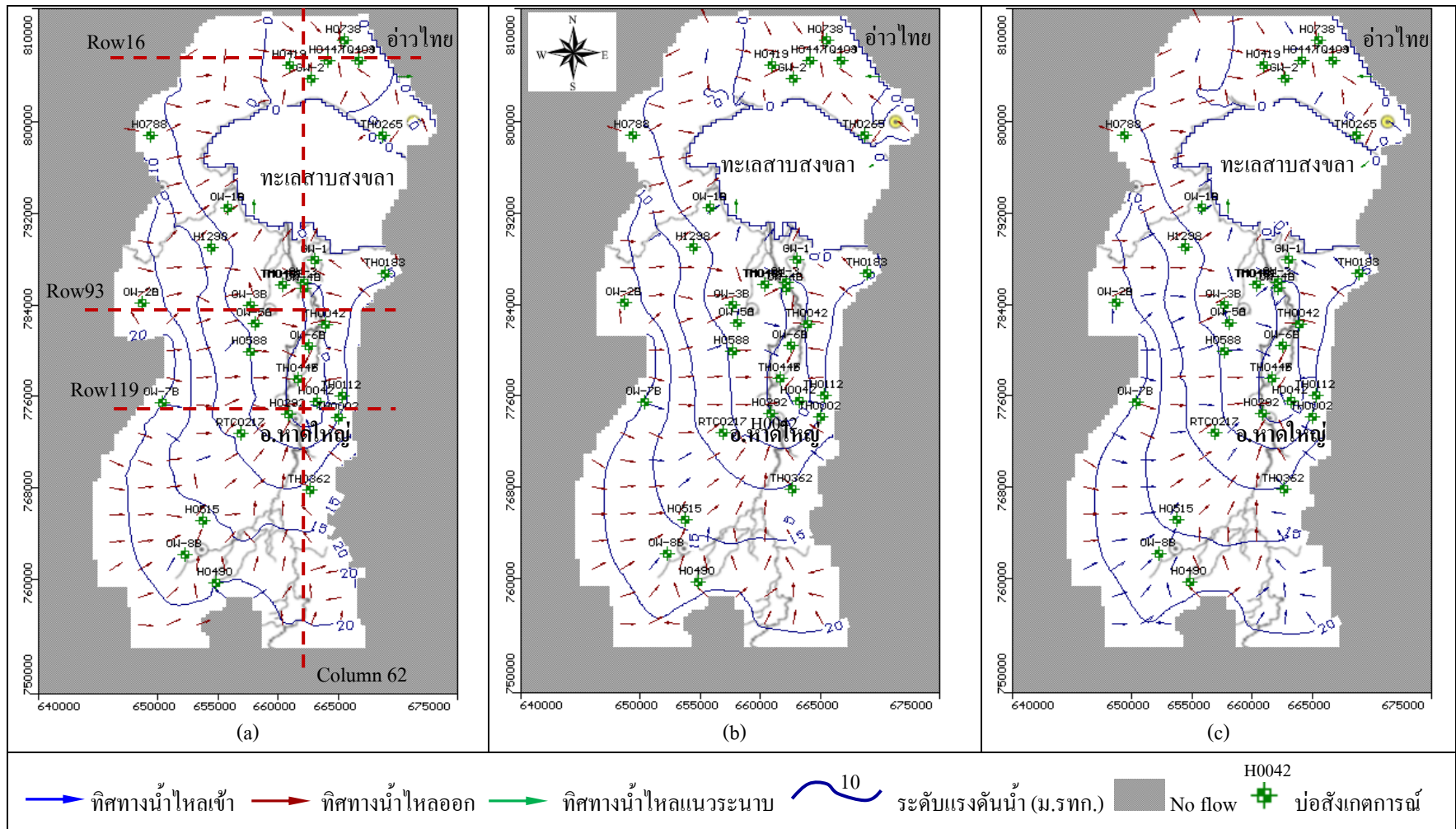
ผลจากจำลองการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าผลการจำลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ นั่นคือ ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลโดยทั่วไปจะไหลจากพื้นที่เติมน้ำทางทิศตะวันตก (เทือกเขาบรรทัด) และทิศตะวันออก (เทือกเขาคอหงส์) มายังพื้นที่รับน้ำบริเวณกลางแอ่ง รวมกับน้ำจากทิวเขา (เขาวังชิง) แล้วไหลลงสู่ทะเลสาบสงขลา และการไหลของน้ำมีการไหลซึมผ่านชั้นดินในแนวตั้งจากชั้นบนสุด (Recharge) สู่น้ำบาดาลใหญ่ นอกจากนี้ยังพบว่ามีทิศทางการไหลไปยังกรวยน้ำลด (Cone of depression) ซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีการสูบน้ำมาก โดยเฉพาะบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่ (รูปที่ 5.11) ส่วนภาพตัดขวางแสดงทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินดังแสดงในรูปที่ 5.12

5.8.1-2 สมดุลน้ำบาดาล

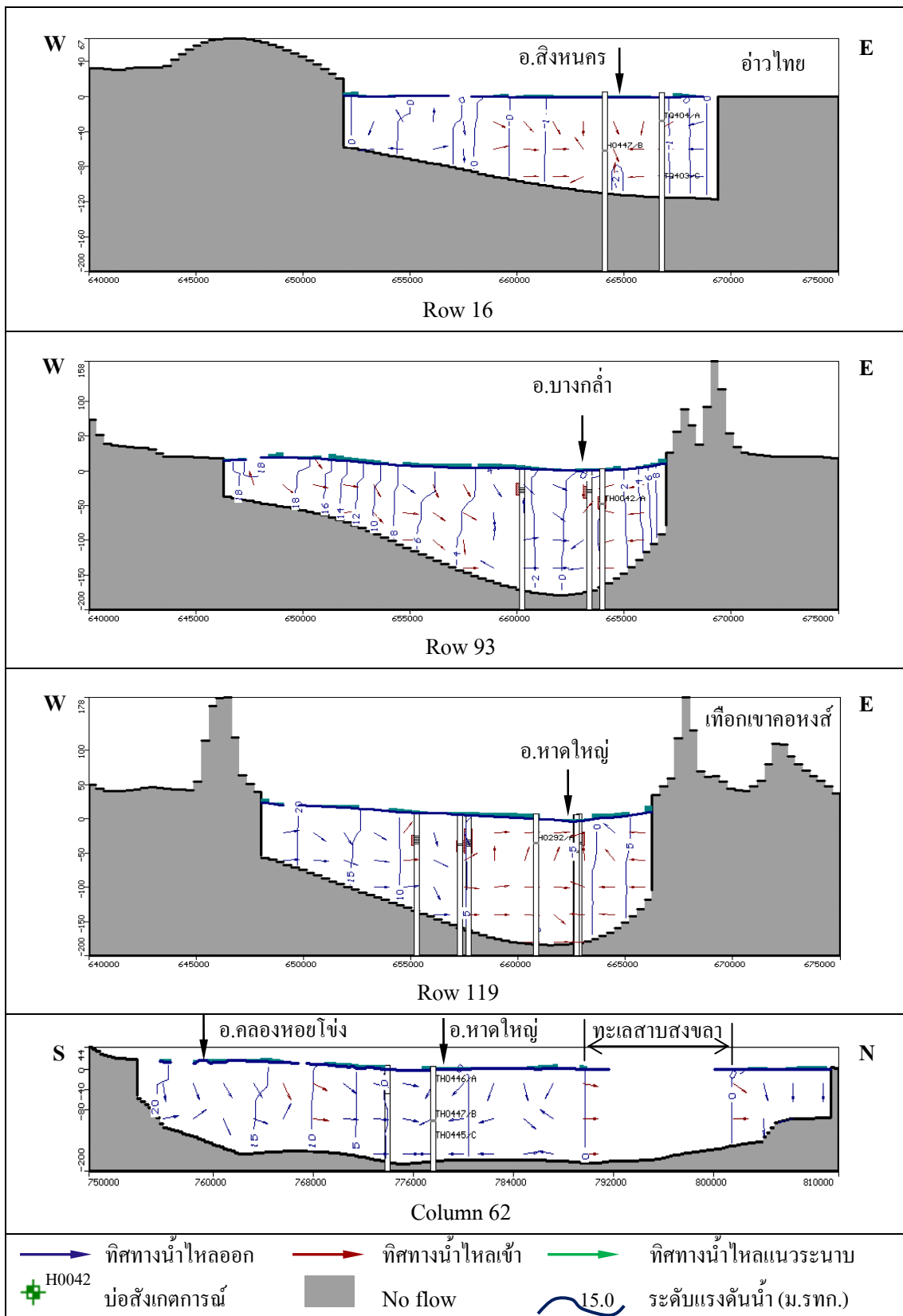
สมดุลน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปีจากการจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (พ.ศ. 2550) ดังสรุปและเปรียบเทียบกับผลที่เคยการศึกษาไว้ในตารางที่ 5.8 พบว่า น้ำที่ไหลเข้าแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยมาจาก General head, recharge, storage, river leakage, และ constant head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลเข้ารวมประมาณ 115 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยมาจาก Storage, well, constant head, river leakage และ general head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลออกรวมประมาณ 115 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

5.8.2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม

5.8.2-1 กรณีความหนาแน่นของน้ำคงที่ (Constant density)



รูปที่ 5.11 ผลการจำลองแสดงทิศทางการไหลแบบสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (ปีที่ 6, พ.ศ.2550) (a) ชั้นน้ำหาดใหญ่ (b) ชั้นน้ำคูเต่า (c) ชั้นน้ำคองหงส์



รูปที่ 5.12 ภาพตัดขวางแสดงทิศทางการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ปีที่ 6 (พ.ศ.2550)

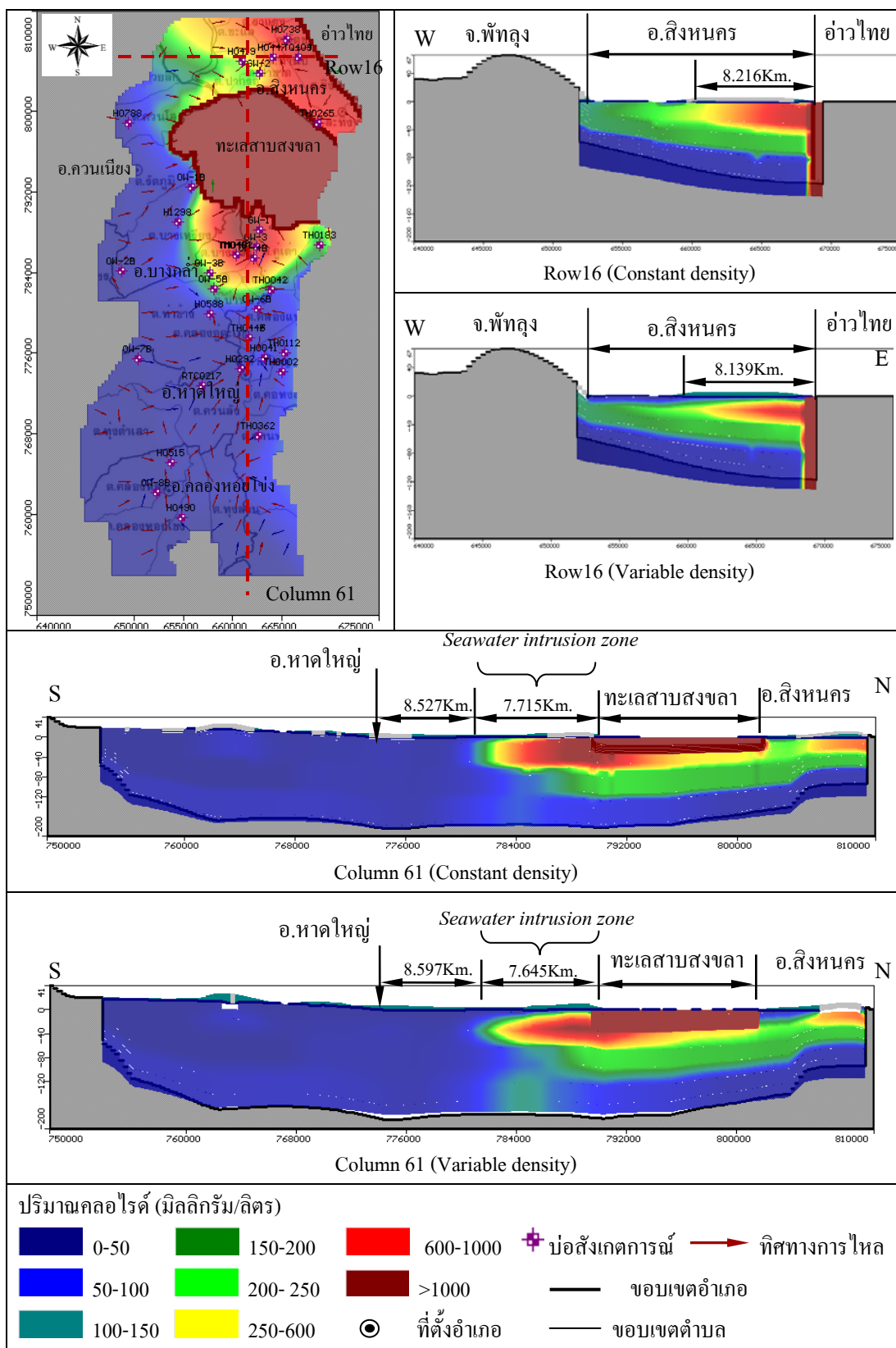
จากผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มในรูปความเข้มข้นของคลอไรด์พบว่า บริเวณที่มีการกระจายตัวของคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐานจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาของ ชื้นน้ำหาดใหญ่ ได้แก่ บริเวณบ้านใต้ บ้านหนองหิน บ้านควน บ้านบางโหนด และริมทะเลอ่าว ไทย ได้แก่ บริเวณวัดศิหลวงนอก ส่วนชั้นน้ำกุ่มเต่าและคองหงส์พบว่าปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี (เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม 250 มก./ล. เกณฑ์อนุ โลมสูงสุด 600 มก./ล.) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการสูบ ใช้น้ำน้อยกว่าชั้นน้ำหาดใหญ่ ภาพการกระจายตัวของคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 5.13

ตารางที่ 5.8 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปีจากการจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (พ.ศ.2550)

แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ล้าน ลบ.ม./ปี)			ปริมาณการไหลออก (ล้าน ลบ.ม./ปี)		
	Thesis (2550)	กรมทรัพยากร น้ำบาดาล, 2546	อมรรัตน์, 2548	Thesis (2550)	กรมทรัพยากร น้ำบาดาล, 2546	อมรรัตน์, 2548
Storage	23.96	98.78	136.82	66.88	201.70	131.63
Constant Head	1.72	0.97	-	7.83	17.60	12.13
Wells	-	-	-	25.03	11.43	16.55
Recharge	28.20	134.74	120.39	-	-	-
River Leakage	7.72	25.87	1.59	10.20	28.94	108.64
General Head	53.40	-	10.46	5.06	-	0.31
Total	115.00	260.37	269.25	115.00	259.66	269.25
IN - OUT = 0 ล้าน ลบ.ม./ปี Percent Discrepancy = 0.00 %						

5.8.2-2 กรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Variable density)

ผลการจำลองโดยรวมมีความสอดคล้องกับกรณี Constant density แต่จะมีความแตกต่างที่รอยต่อขอบเขตน้ำเค็ม (รูปที่ 5.13) นั่นคือบริเวณแนวเชื่อมต่อดังกล่าวมีลักษณะเป็นรูป ลิ่ม (Saltwater wedge) เนื่องจากน้ำทะเลมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำจืด การแพร่กระจายของน้ำเค็ม จึงแตกต่างจากกรณีความหนาแน่นคงที่



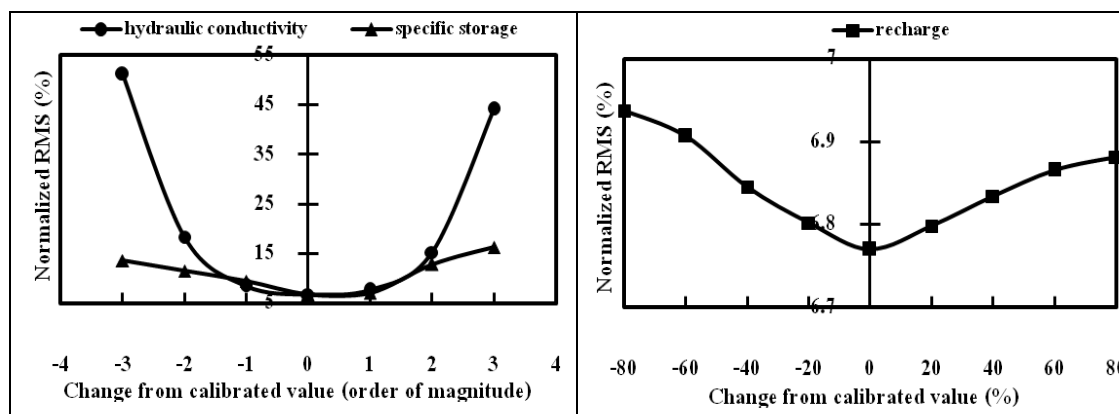
รูปที่ 5.13 ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มในสภาวะการใช้น้ำในปัจจุบัน (พ.ศ.2550)

5.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวทำได้โดยการเพิ่มลดพารามิเตอร์ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะ ปรับครั้งละ Order of magnitude ส่วนอัตราการเพิ่มเติมน้ำ ครั้งละ 20 % เปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับผลของชุดข้อมูลที่ปรับแก้แล้ว โดยพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) เป็นหลัก แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์กับค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อน

5.9.1 การไหลในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

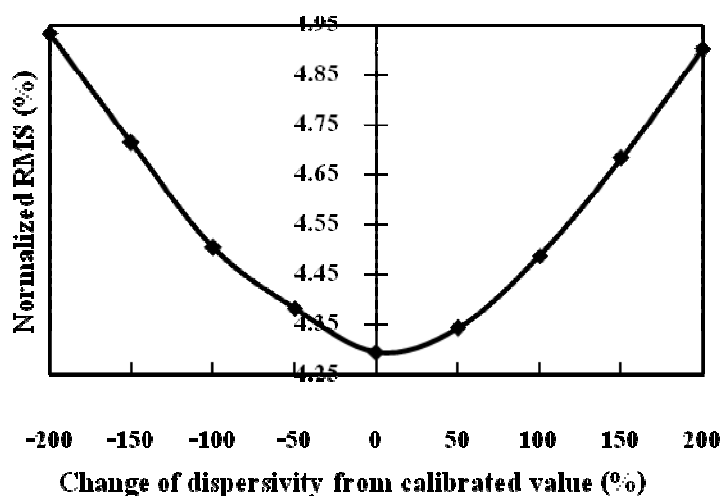
ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองแสดงในรูปที่ 5.14 พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแบบจำลองมากที่สุด คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน อัตราการเพิ่มเติมน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะ ตามลำดับ



รูปที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

5.9.2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำ (Dispersivity) โดยเพิ่มลดครั้งละ 50 % ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองแสดงในรูปที่ 5.15 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำมีผลต่อแบบจำลองไม่มากนัก



รูปที่ 5.15 ผลการวิเคราะห์หาค่าความอ่อนไหวของแบบจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม

5.10 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล (Groundwater Potential Assessment)

การประเมินศักยภาพของน้ำบาดาลในรูปของสมมูลน้ำบาดาล ทำได้โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองการไหลของน้ำบาดาลและการแพร่กระจายของน้ำเค็มที่ได้ปรับเทียบแล้ว และผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่วัดในสนาม โดยมีค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) ไม่เกินร้อยละ 10 (ดังแสดงไว้ในหัวข้อ 5.7) จึงถือได้ว่าแบบจำลองนี้มีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง และนำไปใช้ในการคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในอนาคตได้

ในการประเมินปริมาณการสูบสูงสุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำบาดาล (Safe Yield) ได้กำหนดเงื่อนไขที่ยอมรับได้ในการจำลองดังนี้

- 1) ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำบาดาลใหญ่บริเวณเมืองหาดใหญ่ ต้องลดลงไม่เกิน 5 เมตร ในช่วงเวลา 20 ปี (ระดับน้ำบ่อต้นในพื้นที่ศึกษาอยู่ต่ำกว่าพื้นดินเฉลี่ยไม่เกิน 5 เมตร)
- 2) ปริมาณคลอไรด์ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิน 50 มิลลิกรัม/ลิตร

และได้ทำการจำลองเพื่อประเมินปริมาณการสูบน้ำสูงสุดในหลายกรณี (Scenario) ซึ่งประกอบด้วยกรณีจำลอง 3 กรณี ได้แก่

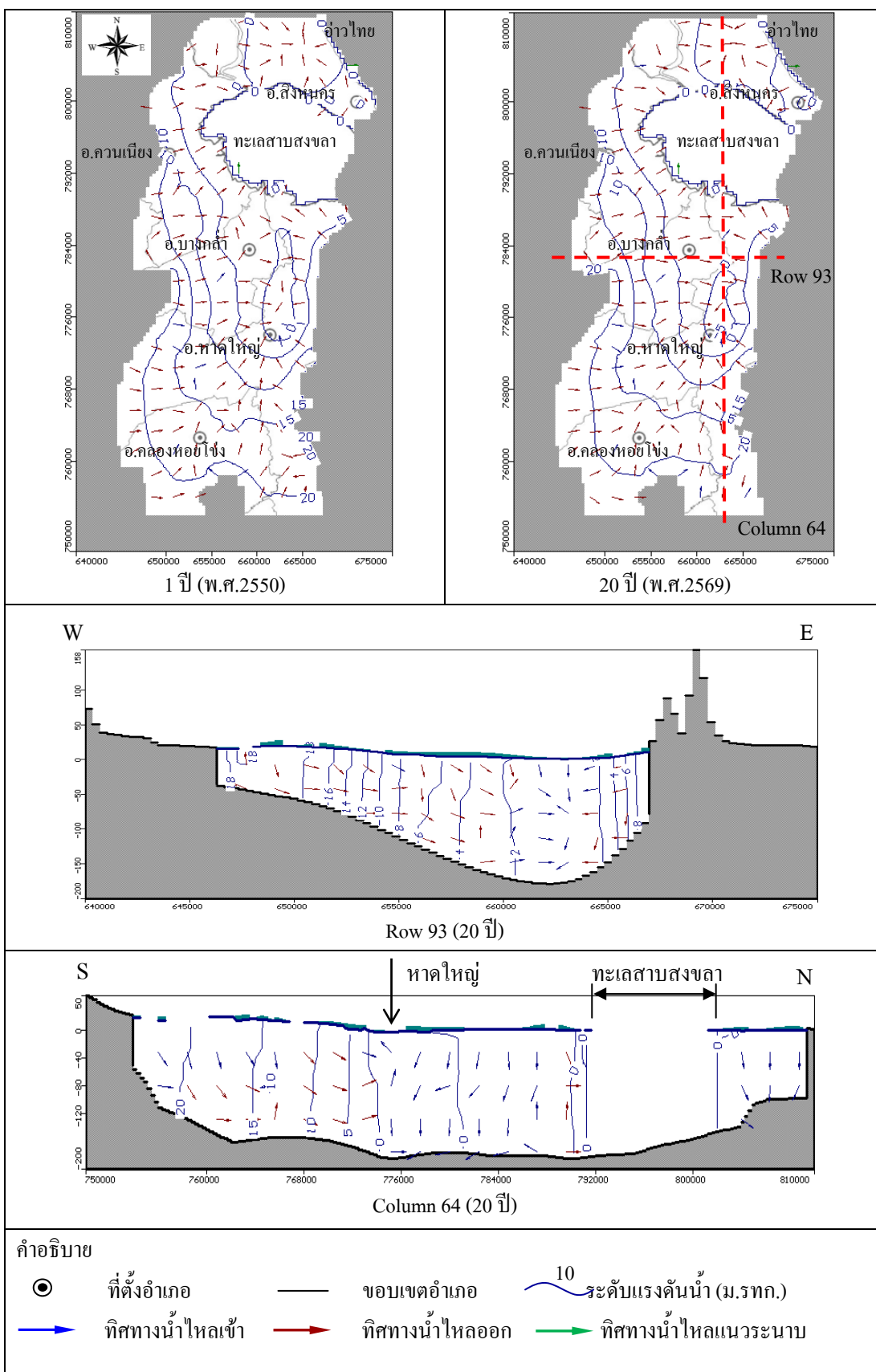
- 1) กรณีที่มีการใช้น้ำคงที่ในช่วงเวลา 20 ปี
- 2) กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วงเวลา 20 ปีและ
- 3) กรณีที่มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ในช่วงเวลา 20 ปี

5.10.1 กรณีที่ 1 การใช้น้ำคงที่ในช่วงเวลา 20 ปี

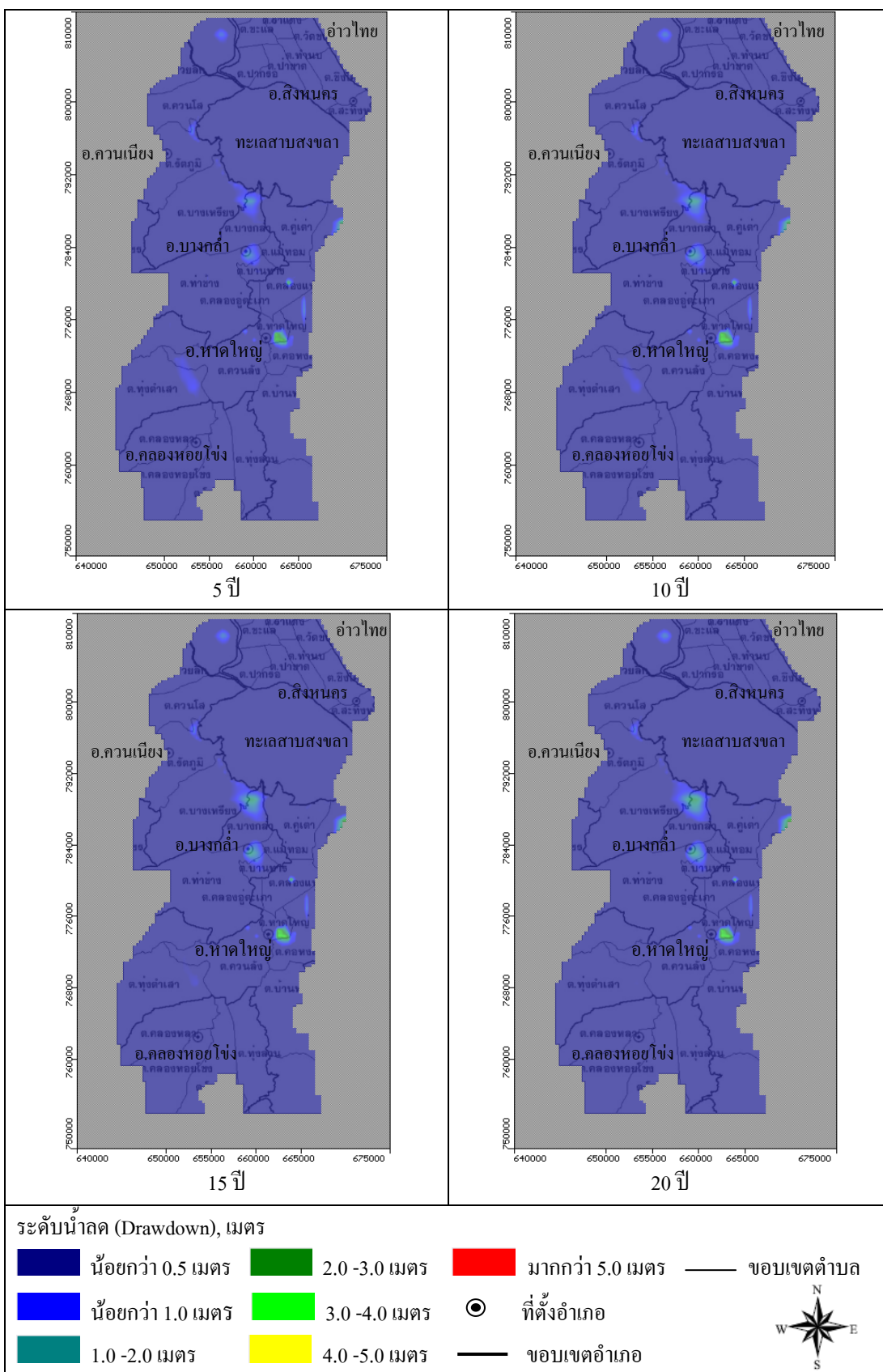
การจำลองการไหลของน้ำบาดาลในกรณีที่ปริมาณการใช้น้ำคงที่ ในช่วง 20 ปี ข้างหน้า (จนถึง พ.ศ.2569) โดยมีอัตราการสูบน้ำ 25.03 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ผลการจำลองพบว่าทิศทางการไหลของน้ำบาดาลไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 5.16) ส่วนบริเวณอำเภอหาดใหญ่เกิดการลดลงของระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำบาดาลใหญ่่น้อยกว่า 2 เมตร (รูปที่ 5.17) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยน้ำลด (Cone of depression) ประมาณ 2.75 กิโลเมตร (6 ตารางกิโลเมตร รอบเมืองหาดใหญ่) ส่วนบริเวณอื่น เช่น อำเภอบางกล่ำ และริมทะเลสาบสงขลาพบว่าลดลงไม่เกิน 2 เมตร

สมดุลน้ำบาดาลในกรณีที่ 1 ได้แสดงในตารางที่ 5.9 พบว่ามีปริมาณน้ำไหลเข้าแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยมาจาก General head, recharge, storage, river leakage, และ constant head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลเข้ารวมประมาณ 94.74 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยออกจาก Storage, well, constant head, river leakage และ general head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลออกรวมประมาณ 94.74 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีที่มีการสูบน้ำคงที่ในช่วง 20 ปี ข้างหน้าพบว่า เกิดการแพร่กระจายน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเฉพาะกรณี Constant density ส่วนกรณี Variable density พบว่า มีการแพร่กระจายในแนวตั้งจากชั้นน้ำบาดาลใหญ่สู่ชั้นน้ำคู้เต่าประมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร บริเวณขอบเขตน้ำเค็ม (Seawater intrusion zone) ได้แก่ ต.บางกล่ำ ต.แม่ทอม ส่วนบริเวณอื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอไรด์อย่างมีนัยสำคัญ ภาพแสดงการแพร่กระจายของน้ำเค็มดังแสดงในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.16 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่ 1 มีการใช้น้ำคงที่ ในช่วงเวลา 20 ปี



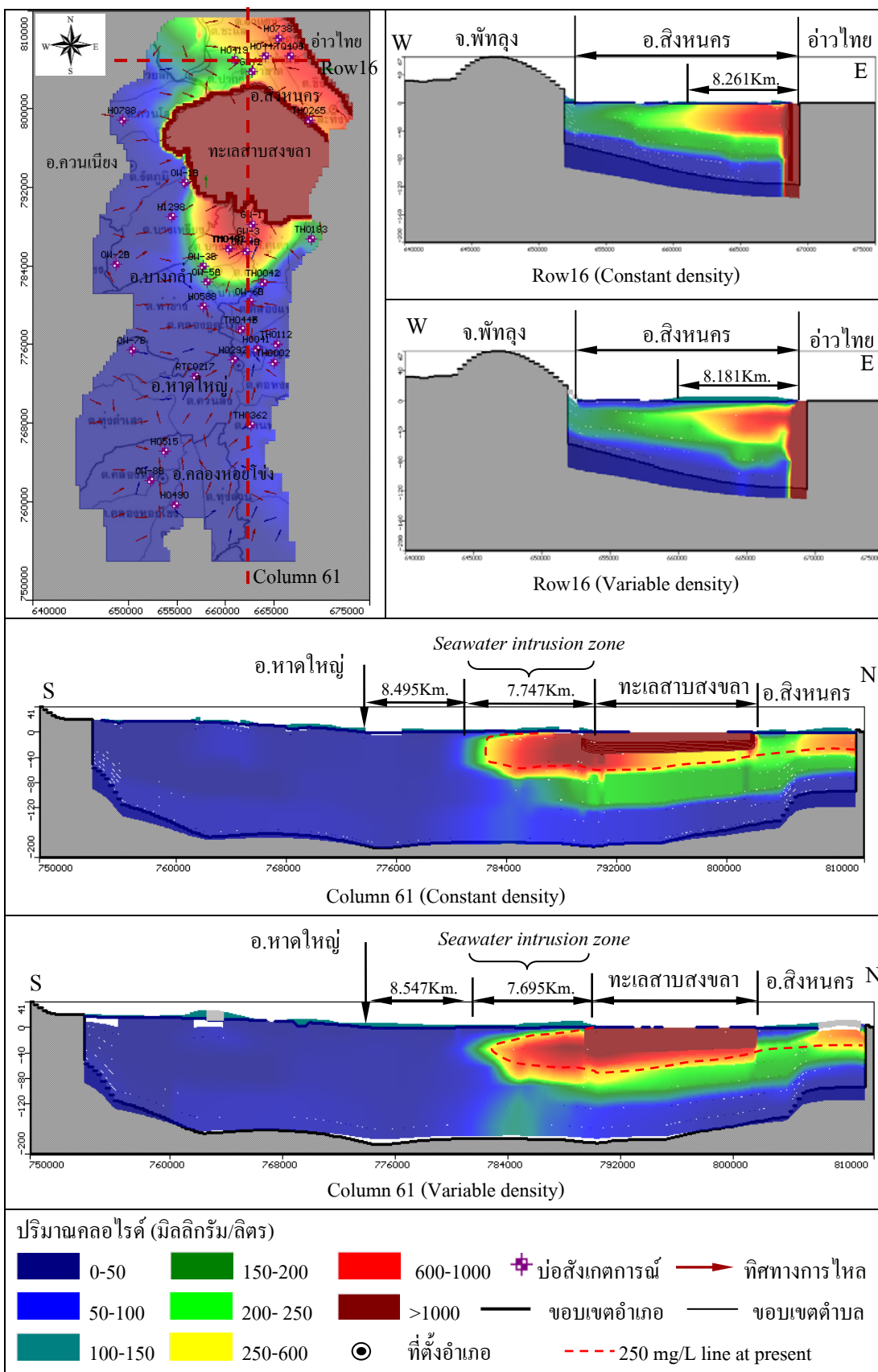
ตารางที่ 5.9 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่ 1 มีการใช้น้ำคงที่ ณ เวลา 20 ปี

แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ล้าน ลบ.ม./ปี)	ปริมาณการไหลออก (ล้าน ลบ.ม./ปี)
Storage	18.52	45.37
Constant Head	1.38	6.38
Wells	-	25.03
Recharge	28.20	-
River Leakage	6.81	11.70
General Head	39.83	6.26
Total	94.74	94.74
IN - OUT = 0 ล้าน ลบ.ม./ปี (Percent Discrepancy = 0.00 %)		

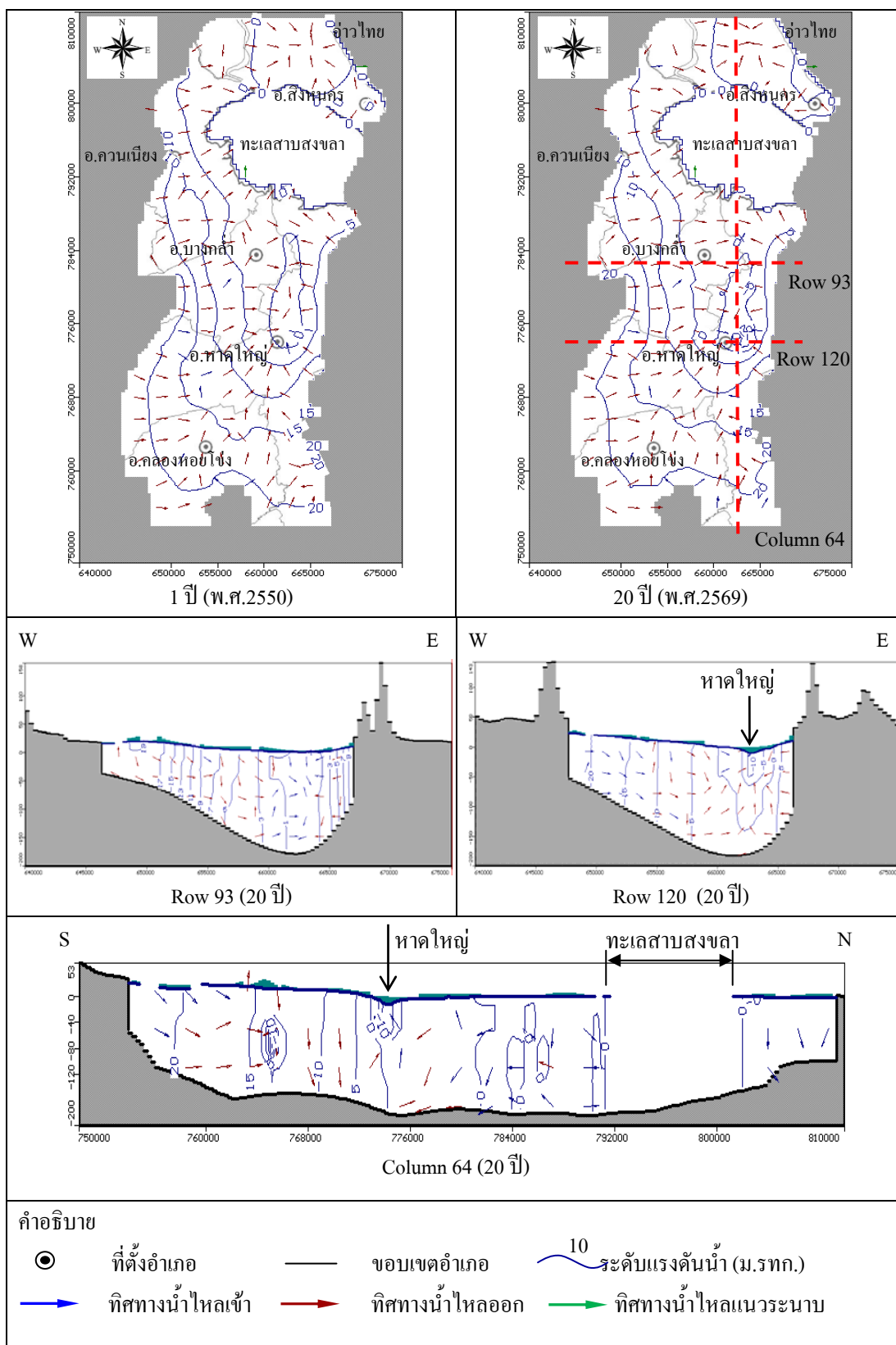
5.10.2 กรณีที่ 2 การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในช่วงเวลา 20 ปี

การจำลองการไหลของน้ำบาดาลในกรณีที่ปริมาณการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในช่วง 20 ปีข้างหน้า ผลการจำลองพบว่า โดยรวมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 5.19) ส่วนบริเวณอำเภอหาดใหญ่เกิดการลดลงของระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำบาดาลใหญ่ประมาณ 0.50-10 เมตร (รูปที่ 5.20) โดยพบว่าที่เวลา 5, 10, 15 และ 20 ปี เกิดระยะน้ำลดสูงสุดประมาณ 3.50, 5.50, 7.0 และ 10 เมตร ตามลำดับ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยน้ำลด (Cone of depression) ประมาณ 2.50-3.75 กิโลเมตร (ประมาณ 8 ตารางกิโลเมตร รอบเมืองหาดใหญ่) ส่วนบริเวณอื่น เช่น อำเภอบางกล่ำ และริมทะเลสาบสงขลาพบว่าลดลงไม่เกิน 2 เมตร

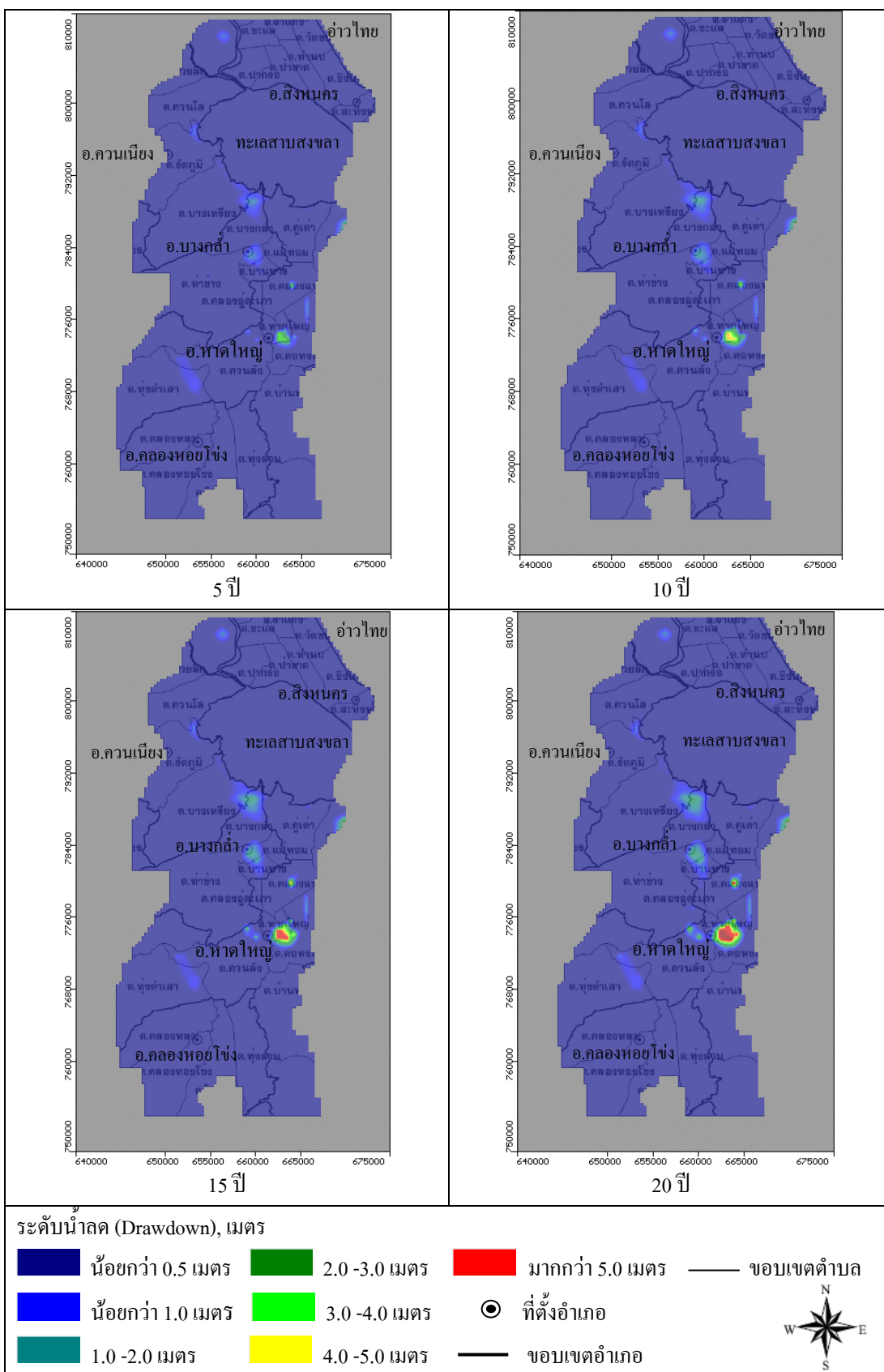
สมดุลน้ำบาดาลในกรณีที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 5.10 พบว่ามีปริมาณน้ำไหลเข้าแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยมาจาก General head, recharge, storage, river leakage, และ constant head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลเข้ารวมประมาณ 118.20 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองเรียงจากมากไปน้อยออกจาก Well, storage, constant head, river leakage และ general head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลออกรวมประมาณ 118.20 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี



รูปที่ 5.18 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่ 1 มีการใช้น้ำคังที่ ในช่วงเวลา 20 ปี (พ.ศ.2550-2569)



รูปที่ 5.19 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่ 2 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วงเวลา 20 ปี



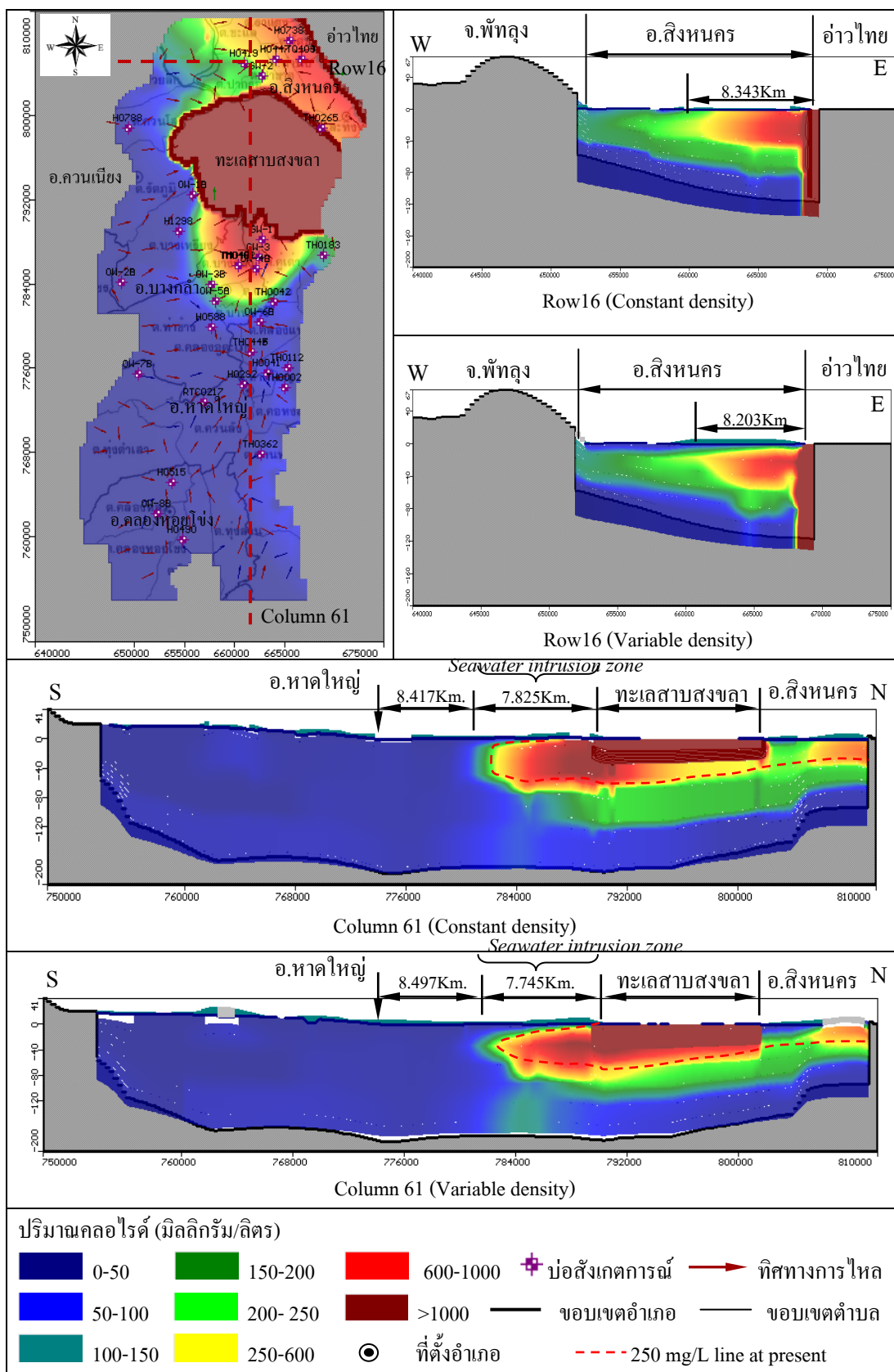
ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีที่มีการสูบน้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในช่วง 20 ปี ข้างหน้าพบว่า เกิดการแพร่กระจายน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเฉพาะกรณี Constant density ส่วนกรณี Variable density พบว่า มีการแพร่กระจายในแนวตั้งจากชั้นน้ำ หาดใหญ่สู่ชั้นน้ำคูเต่าประมาณ 5-10 มิลลิกรัมต่อลิตร บริเวณขอบเขตน้ำเค็ม (Seawater intrusion zone) ได้แก่ ริมทะเลสาบสงขลา ต.บางกล้าและ ต.คูเต่า (บ้านใต้ บ้านควน บ้านแหลมโพธิ์) ส่วน บริเวณอื่น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอไรด์อย่างเป็นนัยสำคัญ ภาพแสดงการแพร่กระจายของ น้ำเค็มกรณีที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5.19

ตารางที่ 5.10 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่ 2 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ณ เวลา 20 ปี

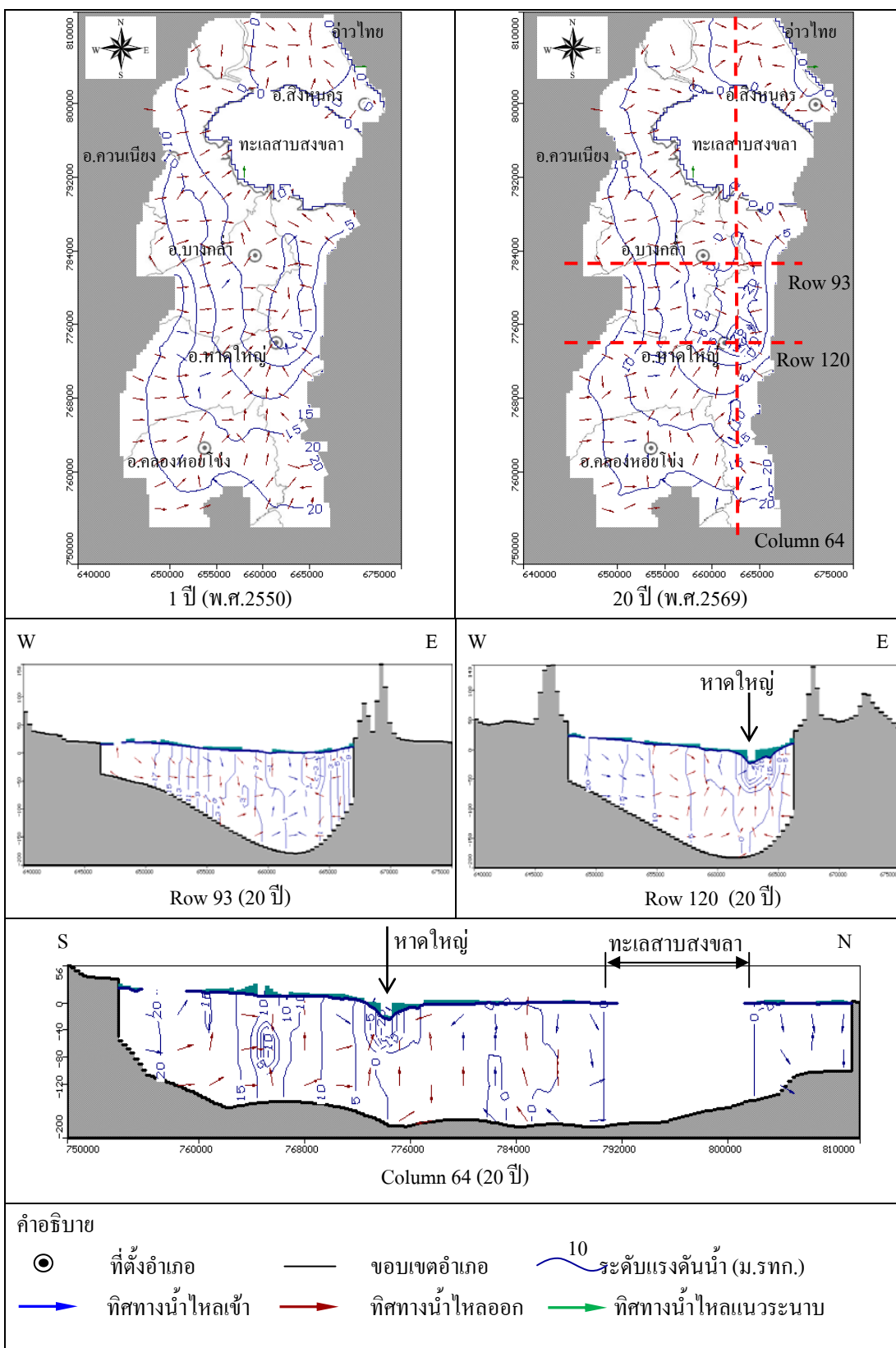
แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ล้าน ลบ.ม./ปี)	ปริมาณการไหลออก (ล้าน ลบ.ม./ปี)
Storage	35.91	32.85
Constant Head	2.25	5.87
Wells	-	62.48
Recharge	28.20	-
River Leakage	7.11	11.27
General Head	44.73	5.73
Total	118.20	118.20
IN - OUT = 0 ล้าน ลบ.ม./ปี (Percent Discrepancy = 0.00 %)		

5.10.3 กรณีที่ 3 การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 20 ปี

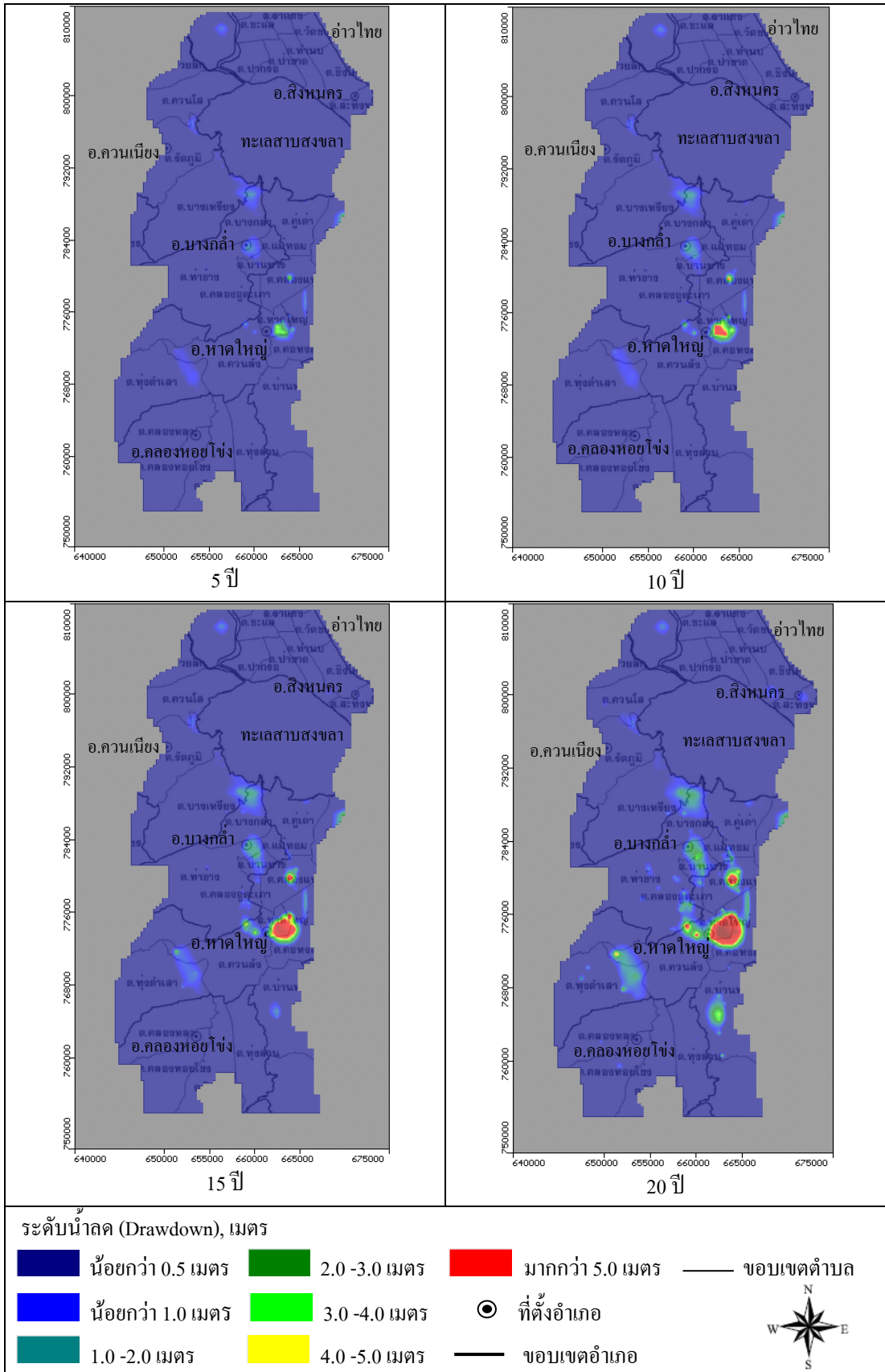
การจำลองการไหลของน้ำบาดาลในกรณีที่ปริมาณการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วง 20 ปีข้างหน้า ผลการจำลองพบว่า โดยรวมไม่เกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำได้ดิน มากนัก (รูปที่ 5.22) ส่วนบริเวณอำเภอหาดใหญ่เกิดการลดลงของระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำ หาดใหญ่ประมาณ 0.50-20 เมตร (รูปที่ 5.23) โดยพบว่าที่เวลา 5, 10, 15 และ 20 ปี เกิดระยะน้ำลด สูงสุดประมาณ 3.50, 8.0, 12.0 และ 20.0 เมตร ตามลำดับ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยน้ำลด (Cone of depression) ประมาณ 3.0-4.85 กิโลเมตร (ประมาณ 12 ตารางกิโลเมตร รอบเมือง หาดใหญ่) ส่วนบริเวณอื่น เช่น ต.แม่ทอม ต.บางกล้า ต.บ้านหาร อ.บางกล้า ต.คูเต่า อ.หาดใหญ่และ รอบๆทะเลสาบสงขลาพบว่าลดลงไม่เกิน 3 เมตร



รูปที่ 5.21 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่ 2 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วงเวลา 20 ปี



รูปที่ 5.22 ระดับน้ำและทิศทางการไหล กรณีที่ 3 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ในช่วงเวลา 20 ปี



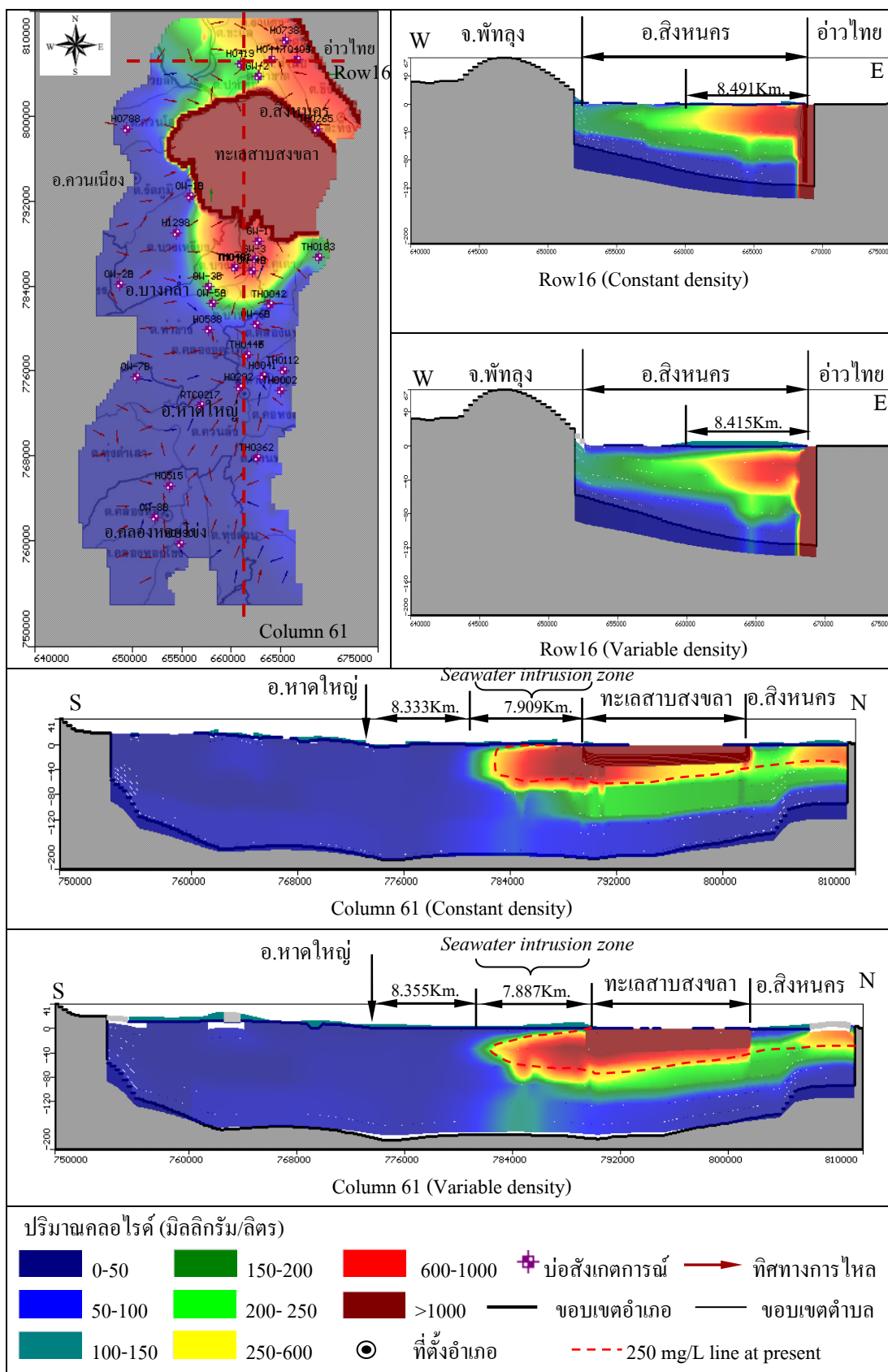
รูปที่ 5.23 ระดับน้ำลด กรณีที่ 3 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 20 ปี

สมดุลน้ำบาดาลในกรณีที่ 3 ดังแสดงในตารางที่ 5.11 พบว่ามีปริมาณน้ำไหลเข้าแบบจำลองมาจาก general head, recharge, storage, river leakage, และ constant head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลเข้ารวมประมาณ 194.61 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองส่วนมากออกจาก well, storage, constant head, river leakage และ general head ตามลำดับ โดยมีปริมาณการไหลออกรวมประมาณ 194.61 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ตารางที่ 5.11 สมดุลของน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี กรณีที่ 3 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% ณ เวลา 20 ปี

แหล่ง	ปริมาณการไหลเข้า (ล้าน ลบ.ม./ปี)	ปริมาณการไหลออก (ล้าน ลบ.ม./ปี)
Storage	98.58	23.15
Constant Head	4.42	5.20
Wells	-	150.44
Recharge	28.20	-
River Leakage	7.93	10.67
General Head	55.48	5.15
Total	194.61	194.61
IN - OUT = 0 ล้าน ลบ.ม./ปี (Percent Discrepancy = 0.00 %)		

ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีที่มีการสูบน้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วง 20 ปี ข้างหน้าพบว่า กรณี Constant density เกิดการแพร่กระจายในแนวราบน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนกรณี Variable density พบว่า มีการแพร่กระจายในแนวตั้งจากชั้นน้ำบาดาลใหญ่สู่ชั้นน้ำเกลือประมาณ 10-20 มิลลิกรัมต่อลิตร บริเวณขอบเขตน้ำเค็ม (Seawater intrusion zone) ได้แก่ ริมทะเลสาบสงขลา ต.บางกล่ำและ ต.คูเต่า (บ้านใต้ บ้านควน บ้านแหลมโพธิ์) ส่วนบริเวณอื่น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอไรด์อย่างมีนัยสำคัญ ภาพแสดงการแพร่กระจายของน้ำเค็มกรณีที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม กรณีที่ 3 มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 20 ปี

5.11 เขตน้ำบาดาลย่อย (Zone Budget)

ในการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้จัดแบ่งพื้นที่ตามเขตน้ำบาดาลย่อยเพื่อแสดงถึงปริมาณน้ำบาดาลที่ไหลเข้าและไหลออกจากชั้นน้ำนั้นๆ ได้ชัดเจนขึ้น โดยแบ่งตามชั้นหินอุ้มน้ำและชั้นกั้นน้ำโดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 สมดุลน้ำบาดาลแบ่งย่อยตามประเภทชั้นหินอุ้มน้ำในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบัน

ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifers)	ปริมาณน้ำไหลเข้า (ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี)	ปริมาณน้ำไหลออก (ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี)
ชั้นกั้นน้ำ_1 (Aquitard_1)	33.35	19.97
ชั้นน้ำบาดาลใหญ่ (Confined aquifer)	49.54	40.36
ชั้นกั้นน้ำ_2 (Aquitard_2)	2.63	11.90
ชั้นน้ำคูเต่า (Confined aquifer)	17.88	20.26
ชั้นกั้นน้ำ_3 (Aquitard_3)	1.39	11.30
ชั้นน้ำคองกรีต (Confined aquifer)	10.21	11.21
รวม	115.00	115.00

สมดุลน้ำจากตารางที่ 5.12 พิจารณาชั้นน้ำบาดาลใหญ่ซึ่งมีการใช้น้ำบาดาลมากที่สุดพบว่า มีปริมาณน้ำไหลเข้าประมาณ 49.54 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งได้จาก General head 21.96 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (44%) Recharge 18.50 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (38%) Storage 8.40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (17%) และ Constant head 0.68 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (1%) ส่วนปริมาณน้ำไหลออกประมาณ 40.36 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งออกไปสู่ Storage 19.72 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (49%) Well 14.18 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (35%) General head 3.31 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (8%) และ Constant head 3.15 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (8%)

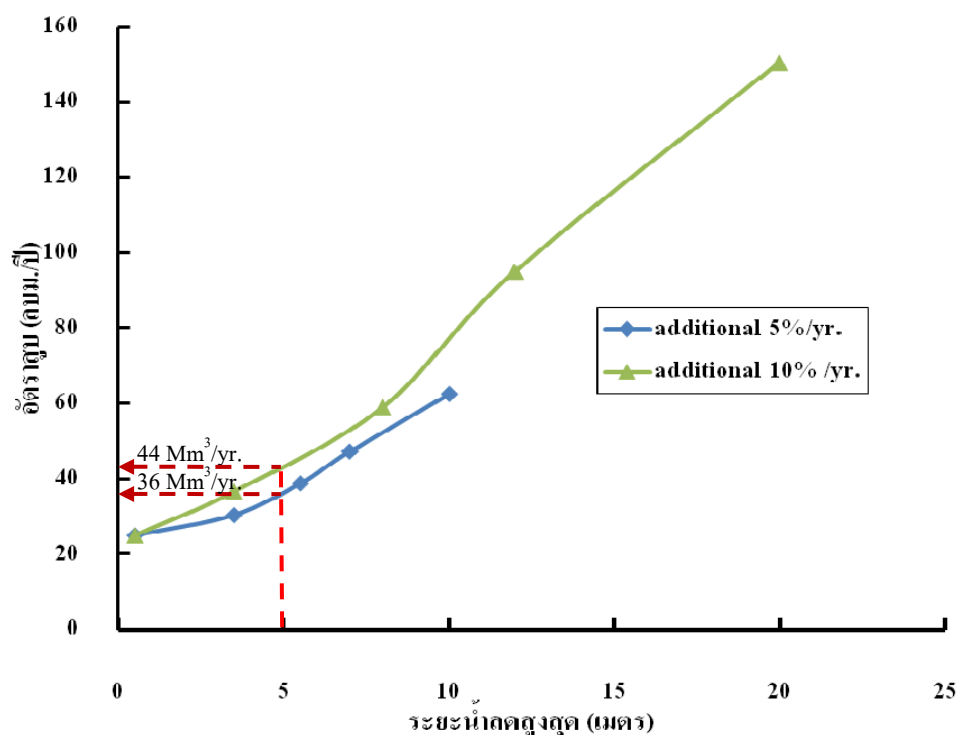
ชั้นน้ำคูเต่ามีการใช้น้ำมากรองจากชั้นน้ำบาดาลใหญ่โดยมีปริมาณน้ำไหลเข้าประมาณ 17.88 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และปริมาณน้ำไหลออกจากประมาณ 20.26 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่วนชั้นน้ำคองกรีตมีการใช้น้ำน้อยที่สุดโดยมีปริมาณน้ำไหลเข้าประมาณ 10.21 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และปริมาณน้ำไหลออกประมาณ 11.21 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

5.12 ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย (Safe yield)

การประเมินปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยของชั้นน้ำบาดใหญ่โดยการใช้แบบจำลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับค่าระยะน้ำลด (Drawdown) ในช่วงเวลา 20 ปี ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.13 และสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังแสดงในรูปที่ 5.25

ตารางที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับระยะน้ำลดสูงสุด

ปีที่ (พ.ศ.)	เพิ่มอัตราสูบปีละ 5%		เพิ่มอัตราสูบปีละ 10%	
	อัตราสูบ (ล้าน ลบม./ปี)	ระยะน้ำลด (เมตร)	อัตราสูบ (ล้าน ลบม./ปี)	ระยะน้ำลด (เมตร)
1 (2550)	25.03	0.50	25.03	0.50
5 (2554)	30.42	3.50	36.65	3.65
10 (2559)	38.83	5.50	59.02	8.00
15 (2564)	49.56	7.00	95.05	12.00
20 (2569)	62.48	10.00	150.44	20.00



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับระยะน้ำลดสูงสุด

รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับระยะน้ำลดของชั้นน้ำบาดาลใหญ่ ในกรณีที่มีการเพิ่มอัตราสูบน้ำปีละ 5% และ 10% ในช่วงเวลา 20 ปี สามารถกำหนดปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย (Safe yield) ได้ดังนี้ (เกณฑ์กำหนดในหัวข้อ 5.10)

1) กรณีที่การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5 % ในช่วงเวลา 20 ปี พบว่า ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยที่จะไม่ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับน้ำเกิน 5 เมตร เท่ากับ 36 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือประมาณ 98,630 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน นั่นคือหากมีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% พบว่าระดับน้ำลดมากกว่า 5 เมตร ภายในเวลา 8 ปี

2) กรณีที่การใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10 % ในช่วงเวลา 20 ปี พบว่า ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยที่จะไม่ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับน้ำเกิน 5 เมตร เท่ากับ 44 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือประมาณ 120,550 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน นั่นคือหากมีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 10% พบว่าระดับน้ำลดมากกว่า 5 เมตร ภายในเวลา 6 ปี

ปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า สอดคล้องกับการศึกษาของ วจิ และสมชัย (2541) ได้ประเมินปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยของแอ่งหาดใหญ่ไว้ที่ 35 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2549) ประเมินปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยของแอ่งหาดใหญ่ไว้ที่ 100 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยกำหนดระดับน้ำลดสูงสุดไม่เกิน 5 เมตร อย่างไรก็ตามระยะน้ำลดสูงสุดอยู่ที่อำเภอหาดใหญ่ ดังนั้นจึงสามารถใช้ระบบบริหารจัดการการสูบน้ำเพื่อให้ได้ Safe yield ของแอ่งหาดใหญ่เพิ่มขึ้น โดยอาจจำกัดอัตราการสูบน้ำของเขตเทศบาลอำเภอหาดใหญ่ไว้แต่เพิ่มอัตราสูบน้ำรอบนอกเขตเทศบาลอำเภอหาดใหญ่ได้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

การศึกษาการไหลของน้ำใต้ดินและการรุกค้ำของน้ำเค็มในแอ่งหาคใหญ่ ประกอบด้วย การศึกษาสภาพธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา การติดตามตรวจวัดระดับน้ำและคุณภาพน้ำบาดาล ศึกษาการไหลและสมดุลของแหล่งน้ำบาดาล และประเมินศักยภาพของน้ำบาดาลเพื่อคาดการณ์การรุกค้ำของน้ำเค็มในอนาคตโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW (version 4.1) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1.1 สภาพอุทกธรณีวิทยาของแอ่งหาคใหญ่

แอ่งหาคใหญ่เป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา วางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ ขอบแอ่งด้านทิศตะวันออก และทิศตะวันตกมีลักษณะเป็นเทือกเขาสูงวางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ ประกอบไปด้วยหินทราย หินดินดานและเชิร์ต ซึ่งเป็นหินอายุคาร์บอนิเฟอรัส และหินแกรนิต แอ่งหาคใหญ่เกิดจากการเคลื่อนไหวของเปลือกโลกทำให้เกิดรอยเลื่อนในแนวเหนือ-ใต้ โดยบริเวณขอบแอ่งทั้งสองด้านถูกยกตัวขึ้นมาในลักษณะ Horst and graben ทำให้บริเวณขอบแอ่งทั้งสองด้านมีตะกอนกรวดขนาดใหญ่ที่เกิดจากการผุพังของหินบริเวณขอบแอ่งตกตะกอนทับถมอยู่เป็นจำนวนมาก ประกอบไปด้วยกรวดขนาดเล็กถึงใหญ่มากใหญ่ ความกลมมนปานกลาง การคัดขนาดไม่ดี ส่วนบริเวณกลางแอ่งมีการสะสมตัวของตะกอนกรวดทราย และดินเหนียวยุคควอเตอร์นารีที่เกิดจากการพัดพาของแม่น้ำสมัยโบราณและแม่น้ำสายปัจจุบัน

ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีของพื้นที่ศึกษาเท่ากับ 1,583 มิลลิเมตร มีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลประมาณ 7.64% ของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย พื้นที่รับน้ำหลักอยู่บริเวณแนวเขาสูงทางทิศตะวันออก ทิศตะวันตกและทิศใต้ ส่วนพื้นที่ให้น้ำคือพื้นที่ราบลุ่มตอนกลางของพื้นที่ แหล่งน้ำบาดาลหลักในพื้นที่คือ แหล่งน้ำบาดาลในตะกอนหินร่วน แบ่งเป็น 3 ชั้นน้ำคือ ชั้นน้ำหาคใหญ่ ชั้นน้ำคูเต่าและชั้นน้ำคองหงส์ ตามลำดับ มีความลึกเจาะน้ำบาดาลตั้งแต่ 20-100 เมตร และมีปริมาณให้น้ำประมาณ 10-50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

6.1.2 การไหลและสมดุลของน้ำใต้ดิน

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองการไหลของน้ำบาดาลในระบบ 3 มิติ ทำการจำลองกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเปรียบเทียบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง การปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าอัตราเพิ่มเติมน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำ โดยใช้ระดับแรงดันน้ำจากบ่อสังเกตการณ์จำนวน 47 บ่อซึ่งกระจายอยู่ในพื้นที่ เป็นระดับอ้างอิงในการปรับเทียบค่าที่ได้จากการจำลอง

ผลการจำลองการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าการไหลของน้ำบาดาลในแบบจำลองมีลักษณะการไหลที่สอดคล้องกับแบบจำลองเชิงมโนทัศน์กล่าวคือ มีทิศการไหลจากพื้นที่เติมน้ำทิศตะวันออก ทิศตะวันตกและทิศใต้ ไปยังที่ราบตอนกลางของพื้นที่ แล้วไหลออกสู่ทะเลสาบสงขลา ส่วนทางทิศเหนือของแอ่งพบว่า มีทิศทางการไหลลงสู่ทะเลสาบและทะเลอ่าวไทย โดยมีค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 6.770 ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.582 เมตร และจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองพบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในแบบจำลองมากที่สุดคือค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ผลการศึกษาสมดุลน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2550 โดยการใช้แบบจำลองพบว่า ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่แบบจำลองมาจาก การเติมน้ำจากชั้นหินอุ้มน้ำของน้ำบาดาลในหินแข็ง (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 ส่วนปริมาณน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลอง ไหลออกไปกักเก็บในชั้นหินอุ้มน้ำ 66.88 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี จากบ่อบาดาลที่มีการสูบน้ำ 25.03 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี คลองรัตภูมิและคลองอู่ตะเภา 10.20 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ทะเลสาบสงขลา 7.83 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และหินแข็ง 5.06 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณน้ำไหลออกจากแบบจำลองทั้งหมด 115.00 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

6.1.3 การรुक้ำของน้ำเค็ม

การศึกษาการรुक้ำของน้ำเค็มในแอ่งหาคใหญ่ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์เป็นตัวบ่งชี้ ผลการปรับเทียบค่าปริมาณคลอไรด์กรณีจำลองให้ความหนาแน่นของน้ำค้ำที่และความหนาแน่นของน้ำค้ำที่ ได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 4.937 และ 5.039 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 36.977 และ 37.765 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอไรด์น้อย

ผลจากการจำลองพบว่า ในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบันบริเวณที่มีการกระจายตัวของคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐานจะจำกัดขอบเขตอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาและริมทะเลอ่าวไทยของชั้นน้ำหาคใหญ่ ได้แก่ บริเวณบ้านไต้ บ้านหนองหิน บ้านควน บ้านบางโหนด บ้านดีหลวงนอก เป็นต้น มีขอบเขตความเค็มคิดเป็นระยะทางตามแนวเหนือ-ใต้ประมาณ 7.50 กิโลเมตร จากทะเลสาบสงขลาและอยู่ห่างจากเมืองหาคใหญ่ประมาณ 8 กิโลเมตร โดยพื้นที่นี้ได้แก่ ต.บ้านหาร อ.บางกล่ำ ต.คลองแหและ ต.คลองอู่ตะเภา อ.หาคใหญ่ ซึ่งเป็นพื้นที่กันชน (Buffer zone) ส่วนชั้นน้ำค้ำและคองส์พบว่าปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี ส่วนผลการจำลองกรณีกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำค้ำไม่ค้ำที่ (Variable density) การเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงเข้าสู่เขตเทศบาลหาคใหญ่เกิดขึ้นน้อยเนื่องจากยังมีทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินไปสู่ทะเลสาบสงขลา

6.1.4 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล

การประเมินปริมาณการใช้น้ำปลอดภัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำบาดาล (Safe yield) โดยการกำหนดรูปแบบการใช้น้ำในอัตราที่แตกต่างกัน โดยกำหนดเงื่อนไขที่ยอมรับได้ในการจำลองคือ ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำหาคใหญ่ต้องลดลงไม่เกิน 5 เมตร และปริมาณคลอไรด์มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถสรุปได้ดังนี้

สภาพการใช้น้ำปัจจุบันเท่ากับ 25.03 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หากมีอัตราการใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วง 20 ปีข้างหน้า (พ.ศ.2569) พบว่าจะส่งผลให้ระดับน้ำลดลงสูงสุด 10 เมตร

(ขอบเขตกรวยน้ำลดประมาณ 8 ตารางกิโลเมตร รอบเมืองหาดใหญ่) และหากเพิ่มอัตราการใช้น้ำปีละ 10% จะส่งผลให้ระดับน้ำลดลงสูงสุด 20 เมตร (ขอบเขตกรวยน้ำลดประมาณ 12 ตารางกิโลเมตร รอบเมืองหาดใหญ่) นั่นคือหากมีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราสูบข้างต้นจะส่งผลให้ระดับน้ำลดลงมากกว่า 5 เมตร ภายใน 8 ปี และ 6 ปี ตามลำดับ ส่วนการรुक้าของน้ำเค็มพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้เมืองหาดใหญ่มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นยังไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเป็นเกณฑ์หลักเหนือการรुक้าของน้ำเค็มในการประเมินศักยภาพน้ำบาดาล ดังนั้นจึงกำหนดปริมาณใช้น้ำปลอดภัยของแอ่งหาดใหญ่เท่ากับ 36 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือประมาณ 98,630 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากพื้นที่ศึกษามีขนาดใหญ่ ประกอบกับลักษณะทางด้านอุทกธรณีวิทยาและชั้นน้ำบาดาลที่มีความซับซ้อน สำหรับการศึกษาคั้งนี้ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายที่มีจำกัด การรวบรวมข้อมูลในพื้นที่ศึกษาจึงอาจไม่เพียงพอหรือตรงกับความเป็นจริงมากนัก ดังนั้นความน่าเชื่อถือของแบบจำลองนี้จึงมีเพียงระดับหนึ่งตามข้อจำกัดของข้อมูล การเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสามารถทำได้โดยการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมทั้งในด้านปริมาณและความละเอียด ดังข้อเสนอแนะต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีผลต่อแบบจำลองมากที่สุด ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาข้อมูลทางชลศาสตร์เพิ่มเติมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านทั้งในแนวราบและแนวตั้งของชั้นหินอุ้มน้ำแต่ละชนิดในพื้นที่ศึกษา เพื่อนำมาปรับปรุงแบบจำลองให้มีความถูกต้องมากขึ้น

2) ควรมีการสำรวจด้านธรณีฟิสิกส์ (Seismic test) เพิ่มเพื่อศึกษาความต่อเนื่องของชั้นน้ำในพื้นที่ศึกษา โดยเฉพาะบริเวณที่เป็นขอบเขตน้ำไหลผ่าน (General head boundary)

3) การกำหนดสภาพขอบเขตแบบจำลองมีผลต่อความถูกต้องและแม่นยำในการจำลองมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งควรมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมบริเวณขอบเขตด้านทิศตะวันตกและตะวันออกของพื้นที่ศึกษา ซึ่งได้กำหนดเป็นขอบเขตน้ำไหลผ่าน (General head boundary) ผลการจำลองพบว่าปริมาณน้ำไหลเข้าแบบจำลองมากที่สุด (สภาวะการใช้น้ำปัจจุบันเท่ากับ 53.40 (46.43%) ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี กรณีใช้น้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% และ 10% ในช่วง 20 ปีข้างหน้าเท่ากับ

44.73 (37.84%) และ 55.48 (28.50%) ด้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ) เพื่อจะได้นำมาปรับปรุงแบบจำลองให้มีความถูกต้องมากขึ้น

4) ควรมีการเก็บตัวอย่างน้ำจากคลองอุตะเถาไปวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้นนี้พบว่าคุณภาพน้ำบาดาลของบ่อที่อยู่ติดคลองอุตะเถามีปริมาณสูงมาก อาจเป็นไปได้ว่ามีการปนเปื้อนจากแม่น้ำโดยกำหนดให้มีปริมาณคลอไรด์เริ่มต้น (Initial concentration) ในขอบเขตแม่น้ำสำหรับกรณีการจำลองการรุกคืบของน้ำเค็ม

5) การขาดข้อมูลการใช้ น้ำบาดาลที่แท้จริง ทำให้การประเมินปริมาณการใช้ น้ำทั้งหมดของพื้นที่ศึกษาอาจยังไม่ถูกต้อง ซึ่งคาดว่าจะยังมีการใช้น้ำบาดาลอีกปริมาณมากที่ไม่ได้มีการบันทึกข้อมูลไว้ ดังนั้นจึงควรส่งเสริมให้องค์กรส่วนท้องถิ่น เช่น องค์การบริหารส่วนตำบล บันทึกอัตราการสูบน้ำของบ่อบาดาลทั้งหมดในตำบล รวมทั้งค่าการสูบน้ำที่แท้จริงในภาคเอกชน เพื่อนำมาประเมินอัตราการใช้น้ำที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

6) เพิ่มจำนวนบ่อสังเกตการณ์ให้กระจายครอบคลุมพื้นที่ศึกษาเพื่อเพิ่มความละเอียดของข้อมูลมากขึ้น

บรรณานุกรม

- เกรียงศักดิ์ ศรีสุข (2543). น้ำใต้ดิน-แบบจำลอง-การปนเปื้อน. ขอนแก่น : ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ข้อมูลทรัพยากรธรรมชาติและจัดการสิ่งแวดล้อมลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา, ฝ่าย. (2544). แผนที่ดิจิทัลขอบเขตการปกครองจังหวัดสงขลา. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ข้อมูลทรัพยากรธรรมชาติและจัดการสิ่งแวดล้อมลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา, ฝ่าย. (2544). แผนที่ดิจิทัลขอบเขตลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ข้อมูลทรัพยากรธรรมชาติและจัดการสิ่งแวดล้อมลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา, ฝ่าย. (2544). แผนที่ดิจิทัลแม่น้ำลำคลองจังหวัดสงขลา. 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.
- ราม ธรรมชาติ และคณะ. (2544). การป้องกันอุทกภัยในอำเภอหาดใหญ่. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วี รัมณรงค์ และสมชัย วงศ์สวัสดิ์. (2541). ศักยภาพน้ำบาดาลในประเทศไทย. วารสารชมรมนักอุทกวิทยา. ปีที่ 2, ฉบับที่ 2-2541.

- วินัย ศรีอำพร (2540). วิศวกรรมน้ำใต้ดิน. ขอนแก่น : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สภา สกุดแก้ว. (2539). สภาพน้ำบาดาลบริเวณแอ่งหาคใหญ่ จังหวัดสงขลา. กรุงเทพฯ : ฝ่ายอุทก
ธรณีวิทยา กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี.
- สุจรีต คุณชนกุลวงศ์ และ โชคชัย สุทธิธรรมจิต (2551). การเปรียบเทียบเทคนิคการประเมิน
ศักยภาพน้ำบาดาล. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา. ปีที่ 19. ฉบับที่ 3-2551.
- สุรพล อารีย์กุล. (2534). ศักยภาพน้ำบาดาลในแอ่งหาคใหญ่. สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่
และโลหะวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล, สำนักงาน. (2546). รายงานฉบับสมบูรณ์ ศึกษาความสมดุล
ของแหล่งน้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ แอ่งหาคใหญ่ จังหวัดสงขลา. กรม
ทรัพยากรน้ำบาดาล. กรุงเทพฯ.
- อมรรัตน์ วัฒนธรรม (2548). การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของน้ำบาดาลแอ่งหาคใหญ่ จังหวัด
สงขลา. สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อดุณิคมวิทยา, กรม. (2546). ข้อมูลลักษณะทางอุณิคมวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา.
กรุงเทพฯ.
- Anderson, M.P. and Woessner, W.W. (1992). Applied Groundwater Modeling: Simulation of
Flow and Advective Transport. California : Academic Press, Inc.
- Baxter, G.P. and Wallace, C.C., (1916). Changes in volume upon solution in water of halogen
salts of alkalimetals: IX, American Chemical Society Journal, no. 38, p. 70-104.
- 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.
- 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.
- Lohawijarn, W. (2005). Potential groundwater resources of Hat Yai Basin in Peninsular Thailand by gravity study, Songklanakarin J. Sci. Technol., 27(3) (May – June 2005), 633-647.
- M.A. Sophocleos. (1997). Why "Safe yield" is not Sustainable, Managing Water Resources Systems, Groundwater, Vol.35, No.4, p.561.
- Moss, R., and Moss, G.E.(1990). Handbook of Groundwater Development. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Spitz, K. and Moreno, F. (1996). A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. New York : John Wiley and Sons, Inc.
- Sawata, H., Wongsomsak, S., Tanchotikul, A., Dansawasdi, R., Maneeprapun, K., and Muenlek, S. 1983. A hypothetical idea on the formation of Hat Yai basin and the Songkhla lagoon. In Proceedings of the Annual technical Meeting 1982. Department of Geological Sciences, Chiang Mai University, 109-120.
- 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://www.omafra.gov.on.ca>

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

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

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บ่อสังเกตการณ์

ตารางที่ ก-1 รายละเอียดบ่อสังเกตการณ์ที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	พิกัดบ่อ		สถานี	หมู่ ที่	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	ความ ลึก เจาะ (ม.)	ความ ลึก พัฒนา (ม.)	ระยะท่อกรอง (ม.)	ชั้นน้ำ
		ออก-ตก	เหนือ- ใต้									
1	H0292	660858	774119	วัดหาดใหญ่ใน		ควนลัง	หาดใหญ่	สงขลา	49.50	45.00	30.00 – 42.00	หาดใหญ่
2	H0419	661002	804878	วัดบ่อทราย	2	ปากอ	สิงหนคร	สงขลา	57.00	57.00	25.50 – 31.50	หาดใหญ่
3	H0490	654892	759625	วัดโคกเหรียญ	8	ทุ่งลาน	คลองหอยโข่ง	สงขลา	45.00	42.00	30.00 – 39.00	หาดใหญ่
4	H0588	657731	780220	บ้านห้วยหลอ	3	ท่าช้าง	บางกล่ำ	สงขลา	31.00	27.00	19.50 – 25.50	หาดใหญ่
5	H0788	649258	798920	วัดโพธิ์ธรรมาราม	7	ควนโส	ควนเนียง	สงขลา	52.50	52.50	36.00 - 42.00	หาดใหญ่
6	H1298	654406	789053	วัดป่ากัณฑ์พงษ์	8	บางเหรียญ	ควนเนียง	สงขลา	75.00	66.00	48.00 – 54.00	หาดใหญ่
7	TH0042	663990	782351	โรงเรียนบ้านทุ่งน้ำ	9	คลองแห	หาดใหญ่	สงขลา	54.00	54.00	45.00 – 51.00	หาดใหญ่
8	TH0112	665382	776062	วัดหงษ์ประดิษฐาราม	3	คอหงส์	หาดใหญ่	สงขลา	96.00	63.00	51.00 – 54.00	หาดใหญ่
9	TH0362	663003	767490	วัดพระบาท		บ้านพรุ	หาดใหญ่	สงขลา	36.00	36.00	28.00 – 32.00	หาดใหญ่
10	TH0183	668860	786809	บ้านท่านางหอม	6	น้ำน้อย	หาดใหญ่	สงขลา	66.00	66.00	50.00 - 58.00	หาดใหญ่
11	H0042	663017	775446	เทศบาลนครหาดใหญ่		หาดใหญ่	หาดใหญ่	สงขลา	75.00	75.00	45.00 – 57.00	หาดใหญ่

ตารางที่ ก-1 รายละเอียดบ่อสังเกตการณ์ที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	พิกัดบ่อ		สถานี	หมู่ ที่	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	ความ ลึก เจาะ (ม.)	ความ ลึก พัฒนา (ม.)	ระยะท่อกรอง (ม.)	ชั้นน้ำ
		ออก-ตก	เหนือ- ใต้									
12	H0515	653734	765102	วัดเลียบ	3	คลองหอยโข่ง	คลองหอยโข่ง	สงขลา	75.00	75.00	60.00 – 72.00	คูเต่า
13	H0738	665837	806911	โรงเรียนบ้านขนุน	6	วัดขนุน	สิงหนคร	สงขลา	105.0	96.00	90.00 – 96.00	คูเต่า
14	H0447	664446	805047	บ้านหนองโดน	1	รำแดง	สิงหนคร	สงขลา	111.0	94.50	85.50 – 91.50	คูเต่า
15	TH0265	669224	799178	วัดธรรมโฆษณ์	3	สทิงหม้อ	สิงหนคร	สงขลา	126.0	126.0	114.00 – 122.00	คองหงส์
16	TH0002	665417	774332	มอ.หาดใหญ่		หาดใหญ่	หาดใหญ่	สงขลา	141.0	139.5	108.00 – 126.00	คองหงส์
17	TH0446	661747	777529	วัดแก้วสว่างวราราม	1	คลองแห	หาดใหญ่	สงขลา	57.00	56.00	44.00 – 52.00	หาดใหญ่
18	TH0447	661747	777529	วัดแก้วสว่างวราราม	1	คลองแห	หาดใหญ่	สงขลา	120.0	110.0	86.00 – 92.00	คูเต่า
19	TH0445	661747	777529	วัดแก้วสว่างวราราม	1	คลองแห	หาดใหญ่	สงขลา	270.0	189.0	150.00 – 175.00	คองหงส์
20	TQ404	666760	805399	วัดศีลหลวงนอก	9	ชิงโค	สิงหนคร	สงขลา	78.00	60.00	49.00 – 57.00	หาดใหญ่
21	TQ403	666760	805399	วัดศีลหลวงนอก	9	ชิงโค	สิงหนคร	สงขลา	125.0	125.0	113.00 – 121.00	คองหงส์
22	TM0482	660495	788372	วัดท่าเมรุ	5	บางกล้า	บางกล้า	สงขลา	84.00	81.00	69.00 – 77.00	คูเต่า
23	TM0481	660495	788372	วัดท่าเมรุ	5	บางกล้า	บางกล้า	สงขลา	150.0	129.0	108.00 – 114.00	คองหงส์
24	RTC0217	658425	768138	วัดชัยชนะสงคราม	3	ควนดั่ง	หาดใหญ่	สงขลา	174.0	173.0	164.00 – 170.00	คองหงส์
25	OW-1a	655784	792462	วัดโคกเมือง	12	บางเหรียญ	ควนเนียง	สงขลา	62.00	60.00	48.00 – 54.00	หาดใหญ่

ตารางที่ ก-1 รายละเอียดข้อสังเกตการณ์ที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

ลำดับ ที่	หมายเลข ข้อ	พิกัดข้อ		สถานี	หมู่ ที่	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	ความ ลึก เจาะ (ม.)	ความ ลึก พัฒนา (ม.)	ระยะท่อกรอง (ม.)	ชั้นน้ำ
		ออก-ตก	เหนือ- ใต้									
26	OW-1b	655784	792462	วัดโคกเมือง	12	บางเหริยง	ควนเนียง	สงขลา	114.0	111.0	102.00 – 106.00	คูเต่า
27	OW-1c	655784	792462	วัดโคกเมือง	12	บางเหริยง	ควนเนียง	สงขลา	164.0	162.0	150.00 – 156.00	คองหงส์
28	OW-2a	648692	784174	บ้านแพรกสุวรรณ	11	บางเหริยง	ควนเนียง	สงขลา	58.00	57.00	48.00 – 54.00	หาดใหญ่
29	OW-2b	648692	784174	บ้านแพรกสุวรรณ	11	บางเหริยง	ควนเนียง	สงขลา	100.0	99.00	90.00 – 96.00	คูเต่า
30	OW-2c	648692	784174	บ้านแพรกสุวรรณ	11	บางเหริยง	ควนเนียง	สงขลา	118.0	117.0	108.00 – 114.00	คองหงส์
31	OW-3b	657506	784218	วัดบางกล้า	1	บางกล้า	บางกล้า	สงขลา	10.8.0	105.0	93.00 – 101.00	คูเต่า
32	OW-3c	657506	784218	วัดบางกล้า	1	บางกล้า	บางกล้า	สงขลา	140.0	138.0	129.00 – 135.00	คองหงส์
33	OW-4a	661667	784908	ป่าช้าบ้านหนองหิน	3	แม่ทอม	บางกล้า	สงขลา	90.00	60.00	52.00 – 56.00	หาดใหญ่
34	OW-4b	661667	784908	ป่าช้าบ้านหนองหิน	3	แม่ทอม	บางกล้า	สงขลา	130.0	90.00	81.00 – 87.00	คูเต่า
35	OW-4c	661667	784908	ป่าช้าบ้านหนองหิน	3	แม่ทอม	บางกล้า	สงขลา	132.0	120.0	111.00 – 117.00	คองหงส์
36	OW-5a	658077	782428	วัดท่าช้าง	2	ท่าช้าง	บางกล้า	สงขลา	65.00	63.00	51.00 – 57.00	หาดใหญ่
37	OW-5c	658077	782428	วัดท่าช้าง	2	ท่าช้าง	บางกล้า	สงขลา	176.0	174.0	156.00 – 168.00	คองหงส์
38	OW-6a	662523	780346	สำนักสงฆ์โดนดแสงทอง	6	คลองแห	หาดใหญ่	สงขลา	42.00	40.00	32.00 – 36.00	หาดใหญ่
39	OW-6b	662523	780346	สำนักสงฆ์โดนดแสงทอง	6	คลองแห	หาดใหญ่	สงขลา	108.0	105.0	96.00 – 102.00	คูเต่า
40	OW-6c	662523	780346	สำนักสงฆ์โดนดแสงทอง	6	คลองแห	หาดใหญ่	สงขลา	144.0	129.0	120.00 – 126.00	คองหงส์

ตารางที่ ก-1 รายละเอียดบ่อสังเกตการณ์ที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	พิกัดบ่อ		สถานี	หมู่ ที่	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	ความ ลึก เจาะ (ม.)	ความ ลึก พัฒนา (ม.)	ระยะท่อกรอง (ม.)	ชั้นน้ำ
		ออก-ตก	เหนือ- ใต้									
41	OW-7b	648768	777820	วัดป่ายาง	9	ท่าช้าง	บางกล้า	สงขลา	110.0	108.0	96.00 – 102.00	คูเต่า
42	OW-7c	648768	777820	วัดป่ายาง	9	ท่าช้าง	บางกล้า	สงขลา	126.0	123.0	114.00 – 120.00	คองหงส์
43	OW-8b	652276	762207	วัดโพธิ์	2	คลองหอยโข่ง	คลองหอยโข่ง	สงขลา	83.00	81.00	72.00 – 78.00	คูเต่า
44	OW-8c	652276	762207	วัดโพธิ์	2	คลองหอยโข่ง	คลองหอยโข่ง	สงขลา	133.0	130.0	114.00 – 126.00	คองหงส์
45	GW-1	663097	787965	ประปาหมู่บ้าน	7	คูเต่า	หาดใหญ่	สงขลา	75.00	72.00	62.00 – 68.00	คูเต่า
46	GW-2	662891	803539	บ้านเทพยา	3	ป่าขาด	สิงหนคร	สงขลา	70.00	42.50	36.50 – 42.50	หาดใหญ่
47	GW-3	662205	785965	ประปาหมู่บ้าน	6	คูเต่า	หาดใหญ่	สงขลา	72.00	70.00	62.00 – 68.00	คูเต่า

ภาคผนวก ข
ข้อมูลน้ำฝน-น้ำท่า

ตารางที่ ข-1 รายละเอียดสถานีวัดน้ำฝน

ลำดับที่	รหัสสถานี	พิกัด		ชื่อสถานี	จังหวัด	ช่วงปีสถิติข้อมูล	ปริมาณฝนเฉลี่ย (มม.)		
		ออก-ตก	เหนือ-ใต้				ต่ำสุด	สูงสุด	รายปี
1	568501	676312	796406	อำเภอเมือง	สงขลา	2530 – 2550	1,042	3,190	1,997
2	568002	661658	774242	อำเภอหาดใหญ่	สงขลา	2530 – 2550	913	2,420	1,613
3	568003	658101	731845	อำเภอสะเดา	สงขลา	2530 – 2550	592	1,575	1,176
4	568005	643205	788930	อำเภอรัตนภูมิ	สงขลา	2530 – 2550	842	2,197	1,599
5	568502	658004	765015	สนามบินหาดใหญ่	สงขลา	2535 - 2550	1,213	2,268	1,747
6	568014	650250	794250	อำเภอควนเนียง	สงขลา	2531 - 2550	665	2,190	1,502
7	568010	670876	770585	อำเภอนาหม่อม	สงขลา	2531 - 2550	803	2,584	1,753
8	568015	652495	759471	อำเภอคลองหอยโข่ง	สงขลา	2537 - 2550	700	1,962	1,339
9	568301	665335	776096	สถานีตรวจอากาศคอหงส์	สงขลา	2535 - 2550	1,266	2,793	2,060
10	568017	656107	783440	อำเภอบางกล่ำ	สงขลา	2539 - 2550	921	2,389	1,521
11	568016	667078	805590	อำเภอสิงหนคร	สงขลา	2537 - 2550	736	2,088	1,547

ตารางที่ ข-2 รายละเอียดปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือน

ลำดับที่	รหัส สถานี	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
1	568501	อำเภอเมือง	70	56	61	70	125	91	84	116	129	257	510	340	1,997
2	568002	อำเภอหาดใหญ่	59	31	79	101	109	97	97	111	14	208	287	290	1,613
3	568003	อำเภอสะเตาะ	33	36	60	85	89	67	64	115	125	173	170	160	1,176
4	568005	อำเภอรัตนภูมิ	49	27	62	100	107	61	88	87	88	223	377	330	1,599
5	568502	สนามบินหาดใหญ่	60	52	94	123	111	141	91	120	136	261	282	275	1,747
6	568014	อำเภอควนเนียง	68	38	49	66	88	65	88	84	76	194	371	316	1,502
7	568010	อำเภอนาหม่อม	62	47	73	78	118	108	107	116	122	229	355	340	1,753
8	568015	อำเภอคลองหอยโข่ง	65	39	69	86	78	83	64	119	95	188	229	224	1,339
9	568301	สถานีตรวจอากาศคอหงส์	83	43	99	95	156	129	125	141	154	251	394	389	2,060
10	568017	อำเภอบางกล่ำ	75	35	57	61	86	79	74	74	75	229	286	390	1,521
11	568016	อำเภอสิงหนคร	56	52	64	36	82	42	68	66	77	203	410	390	1,547
เฉลี่ย			62	42	70	82	104	87	86	104	111	220	334	321	1,623

ตารางที่ ข-3 รายละเอียดสถานีวัดน้ำท่า

ลำดับที่	รหัสสถานี	พิกัด		ชื่อสถานี	จังหวัด	พื้นที่รับน้ำ (ตร.กม.)	ลุ่มน้ำ	ช่วงปีสถิติ ข้อมูล	ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		
		ออก-ตก	เหนือ-ใต้						ต่ำสุด	สูงสุด	รายปี
1	x44	660675	774380	บ้านหาดใหญ่โน	สงขลา	1,720	คลองอู่ตะเภา	2510 - 2549	358	1,800	846
2	x90	659978	767005	บ้านบางศาลา	สงขลา	1,547	คลองอู่ตะเภา	2515 - 2549	227	1,686	715
3	x111	658698	735992	บ้านปรึก	สงขลา	245	คลองอู่ตะเภา	2522 - 2549	34	228	119
4	x112	659188	745467	บ้านตะเคียนเกา	สงขลา	493	คลองอู่ตะเภา	2522 - 2549	120	337	220
5	x113	656000	734000	คลองหล้าปิ้ง	สงขลา	118	คลองอู่ตะเภา	2522 - 2549	11	114	54
6	x173	659503	753957	คลองแงะ	สงขลา	969	คลองอู่ตะเภา	2533 - 2548	-	-	469
7	x174	665000	771000	คลองหวะ	สงขลา	116	คลองอู่ตะเภา	2546 - 2549	48	266	99
8	x240			คลองวาด	สงขลา	127	คลองอู่ตะเภา	2548 - 2549	59	175	117
9	X67a	642185	789669	คลองรัตภูมิ	สงขลา	860	คลองรัตภูมิ	2548 - 2549	128	248	188
10				สิงหนคร	สงขลา	156	สทิงพระ	2518 - 2547	-	-	128
					รวม	6,351					2,956

ตารางที่ ข-4 รายละเอียดปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือน

ลำดับที่	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย (ล้านลูกบาศก์เมตร)												
			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
1	x44	บ้านหาดใหญ่ใน	87	36	35	35	33	21	20	19	26	79	202	253	846
2	x90	บ้านบางศาลา	53	17	18	26	36	24	23	27	37	88	175	191	715
3	x111	บ้านปรึก	5	3	4	6	8	6	6	6	9	21	24	20	119
4	x112	บ้านตะเคียนเกา	6	3	3	7	16	9	11	9	17	43	54	41	220
5	x113	คลองห้วยปิ้ง	2	2	2	3	4	2	2	3	5	11	9	8	54
6	x173	คลองแจะ	29	13	19	26	25	16	15	22	30	72	96	106	469
7	x174	คลองหวะ	8	3	2	2	3	3	2	1	2	7	19	46	99
8	x240	คลองวาด	13	5	6	8	5	3	2	2	2	7	13	52	117
9	X67a	คลองวัดคูมิ	24	8	12	12	10	7	6	4	4	13	27	61	188
10		สิงหนคร	9	7	3	2	4	3	3	3	4	9	38	44	128
รวม			237	95	105	127	144	94	92	96	138	349	658	823	2,956

ตารางที่ ข-5 รายละเอียดสถานีวัดระดับน้ำ

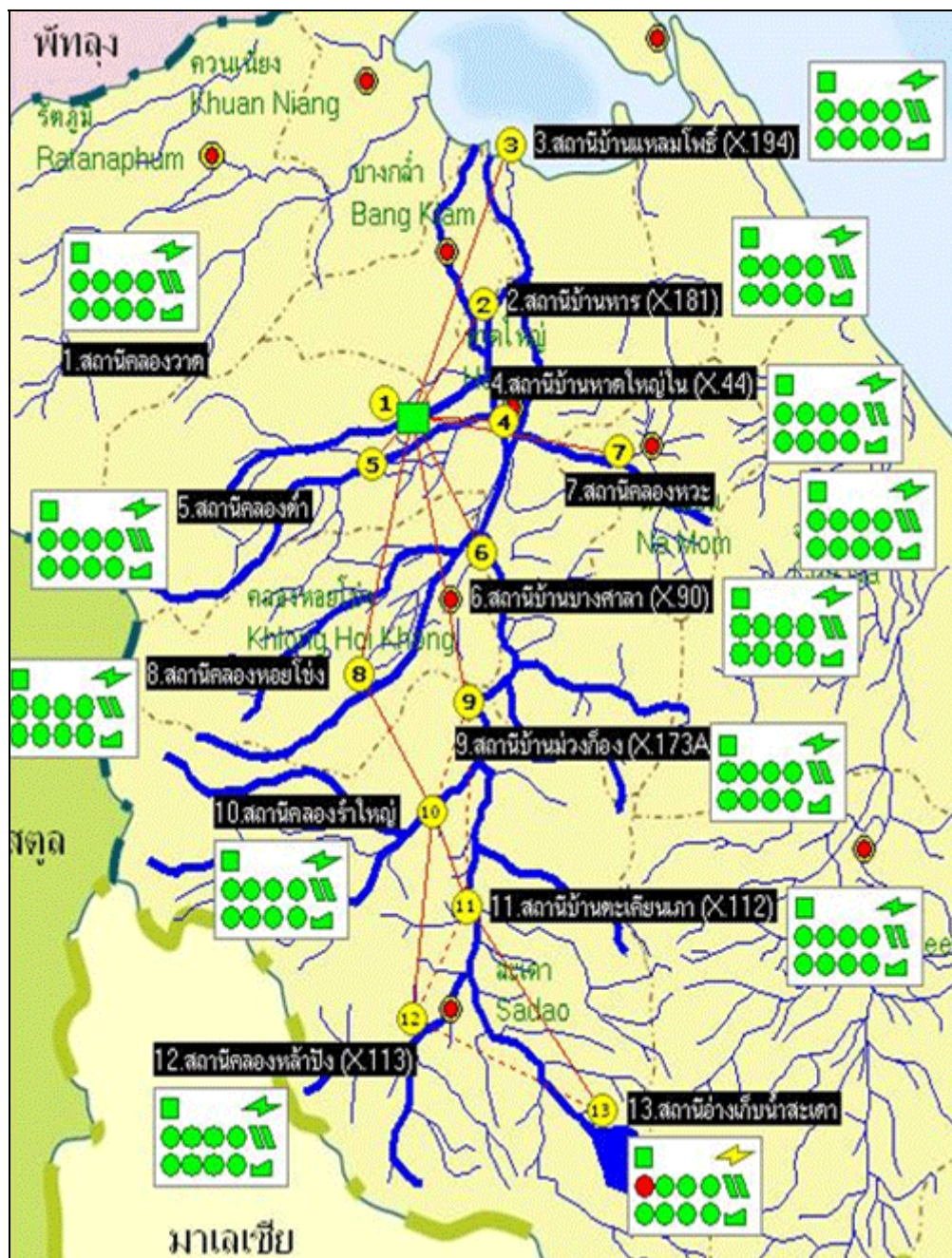
ลำดับที่	รหัสสถานี	พิกัด		ชื่อสถานี	จังหวัด	ลุ่มน้ำ	ช่วงปีสถิติข้อมูล	ระดับน้ำเฉลี่ย (ม.รทก.)		
		ออก-ตก	เหนือ-ใต้					ต่ำสุด	สูงสุด	รายปี
1	x44	660675	774380	บ้านหาดใหญ่โน	สงขลา	คลองอู่ตะเภา	2542 - 2550	-0.52	4.57	0.79
2	x90	659978	767005	บ้านบางศาลา	สงขลา	คลองอู่ตะเภา	2539 - 2550	1.00	6.80	2.82
3	x194	662580	789290	บ้านแหลมโพธิ์	สงขลา	คลองอู่ตะเภา	2547 - 2550	-0.92	0.74	-0.03
4	x181	660560	781075	บ้านหาร	สงขลา	คลองอู่ตะเภา	2547 - 2550	-0.69	2.48	0.14
5	x173a	659503	753957	บ้านม่วงก้อง	สงขลา	คลองอู่ตะเภา	2547 - 2550	8.72	15.00	10.91
6	x67a	642185	789669	คลองรัตภูมิ	สงขลา	คลองรัตภูมิ	2539 - 2545	17.41	19.48	18.12

ตารางที่ ข-6 รายละเอียดสถานีวัดระดับน้ำท่า

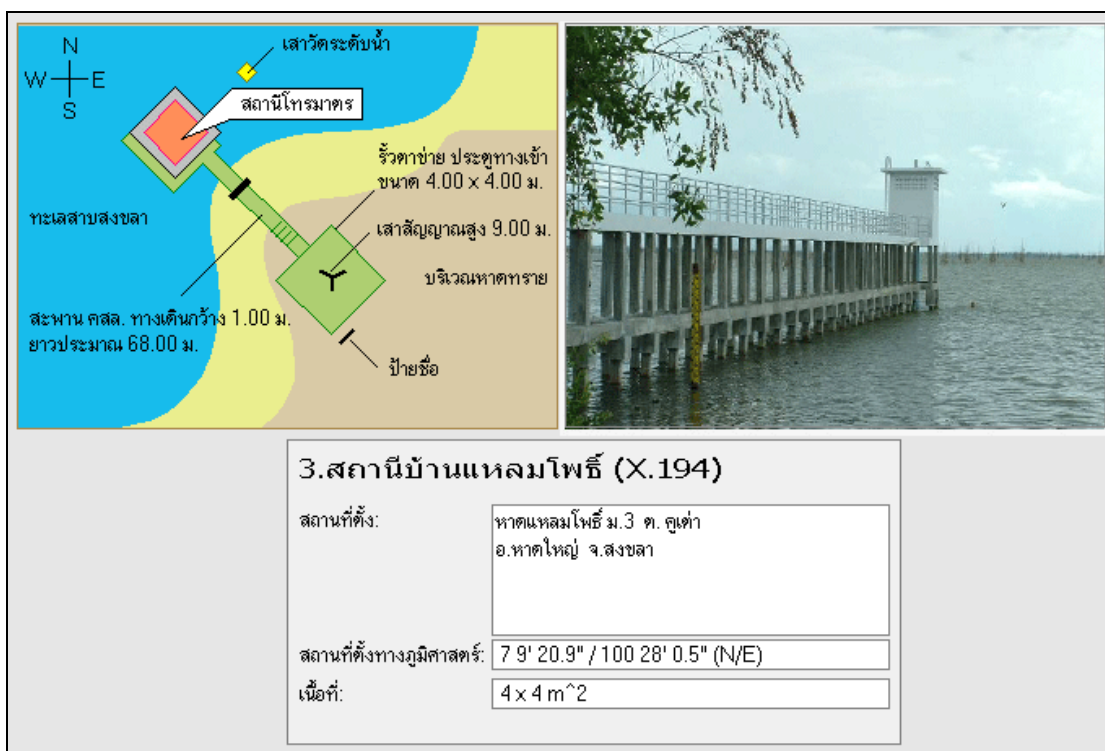
ลำดับที่	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ระดับน้ำเฉลี่ยรายเดือน (ม.รทก.)											
			ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1	x44	บ้านหาดใหญ่ใน	1.02	0.42	0.42	0.84	0.62	0.25	0.11	0.50	0.64	0.75	1.86	2.05
2	x90	บ้านบางศาลา	2.92	2.21	2.30	2.69	2.66	2.24	2.11	2.22	2.51	3.37	4.15	4.45
3	x194	บ้านแหลมโพธิ์	0.11	0.04	0.07	-0.06	-0.13	-0.18	-0.20	-0.46	-0.26	-0.11	0.34	0.40
4	x181	บ้านหาร	0.33	0.13	0.10	0.10	-0.21	-0.16	-0.17	-0.23	-0.15	0.13	0.71	1.01
5	x173a	บ้านม่วงกึ่ง	10.70	10.31	10.25	11.02	11.16	10.89	10.48	9.84	10.48	11.67	12.27	11.83
6	x67a	คลองรัตภูมิ	18.56	18.13	17.96	17.94	17.87	17.76	17.71	17.83	17.86	18.17	18.64	18.99

ภาคผนวก ข-7

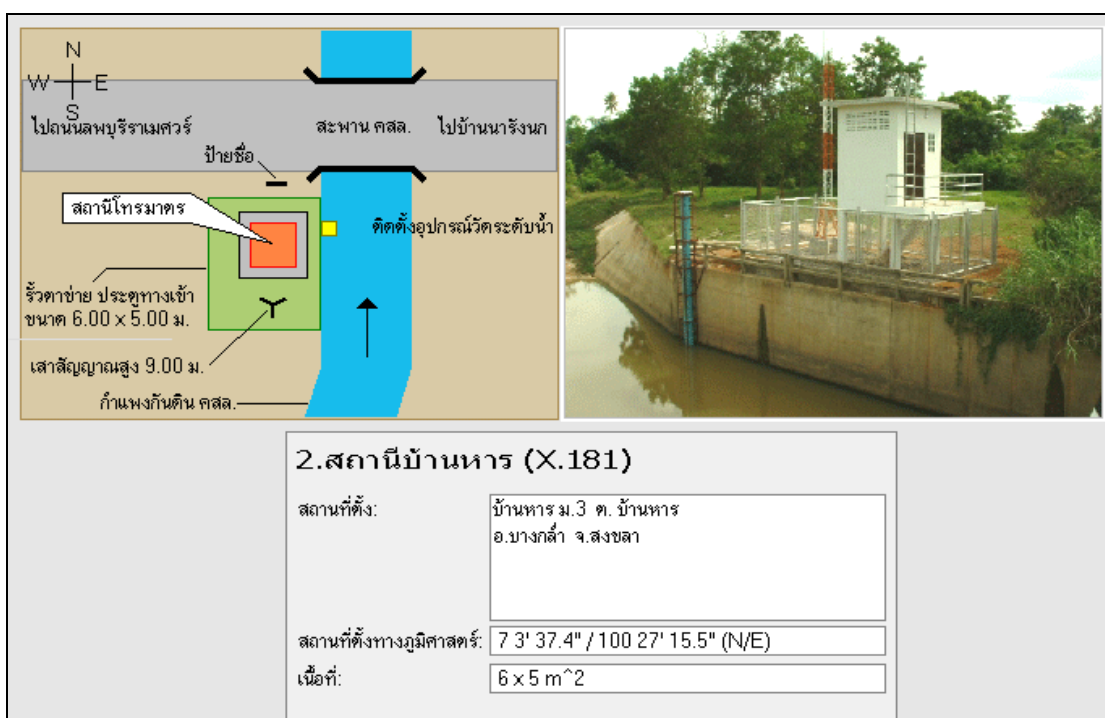
สถานีโทรมาตร



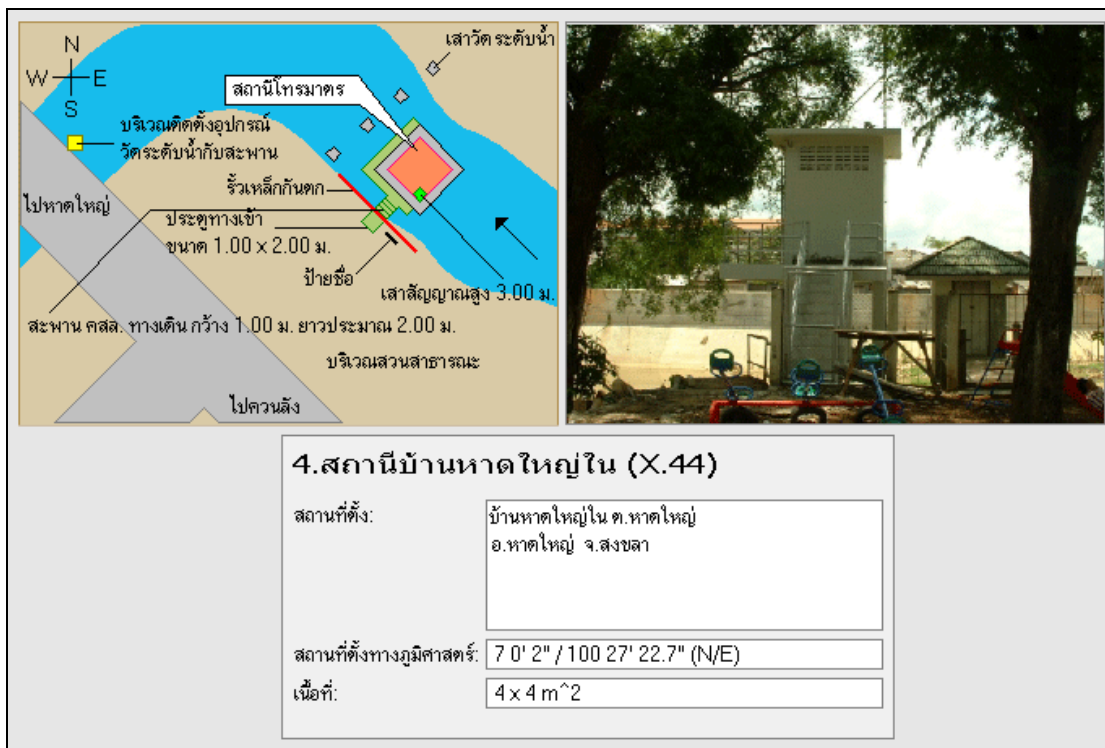
รูปที่ ข-1 แผนผังระบบโทรมาตรคู่มือน้ำคลองอุตตะเกา



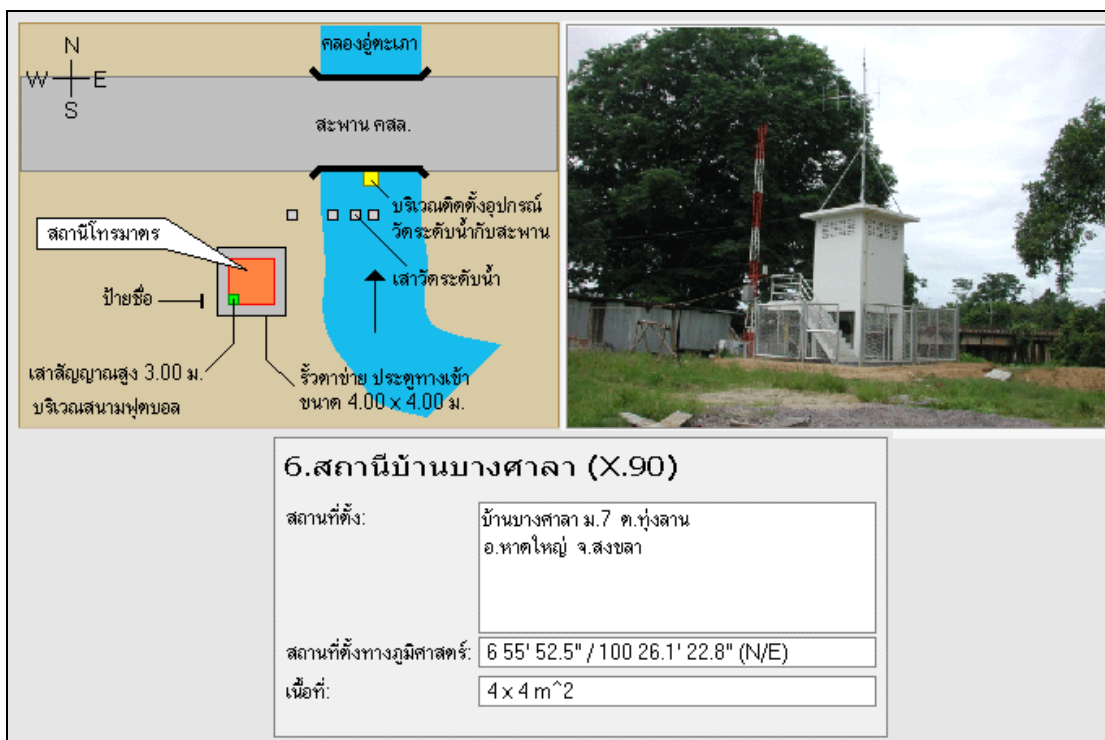
รูปที่ ข-2 สถานีบ้านแหลมโพธิ์ (X.194)



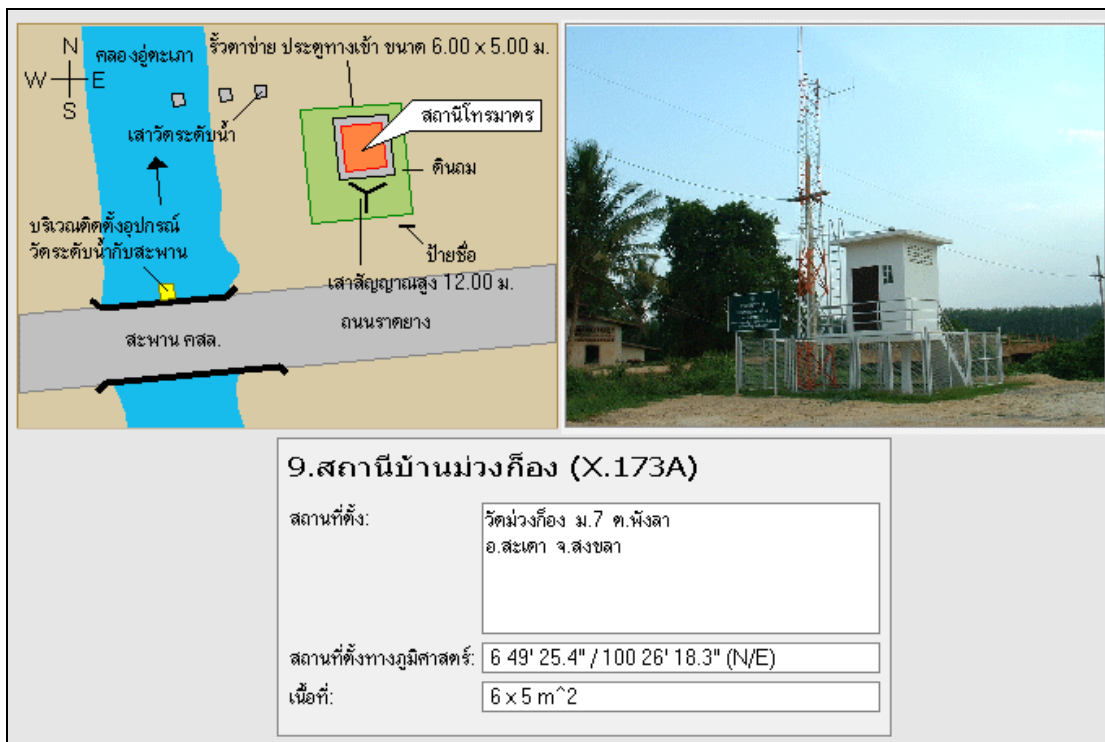
รูปที่ ข-3 สถานีบ้านหาร (X.181)



รูปที่ ข-4 สถานีบ้านหาดใหญ่ใน (X.44)

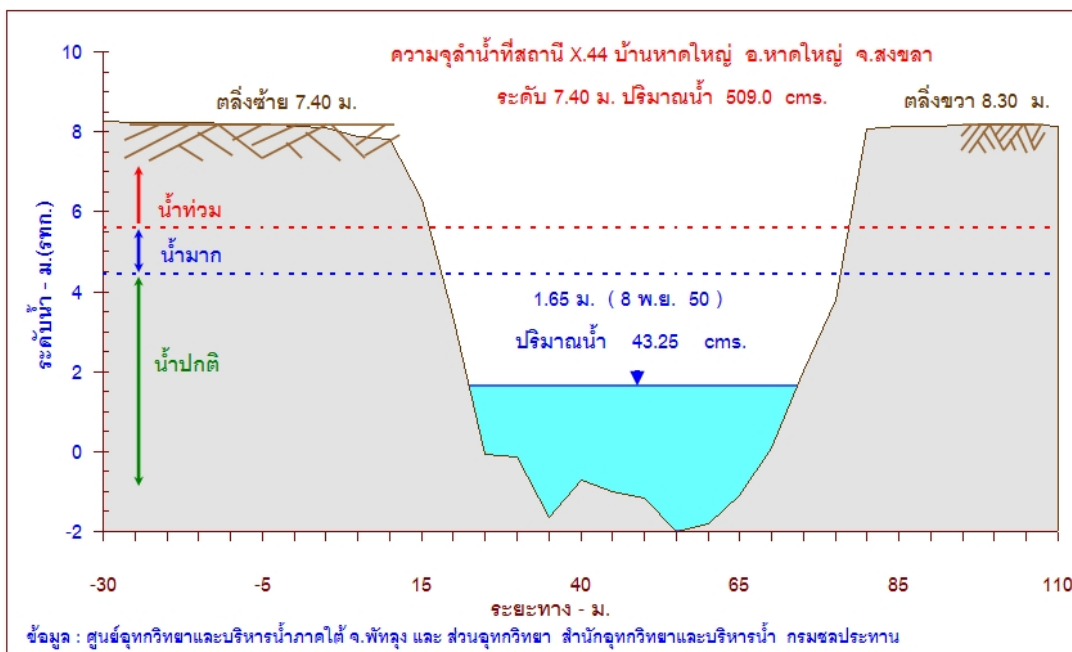


รูปที่ ข-5 สถานีบ้านบางศาลา (X.90)

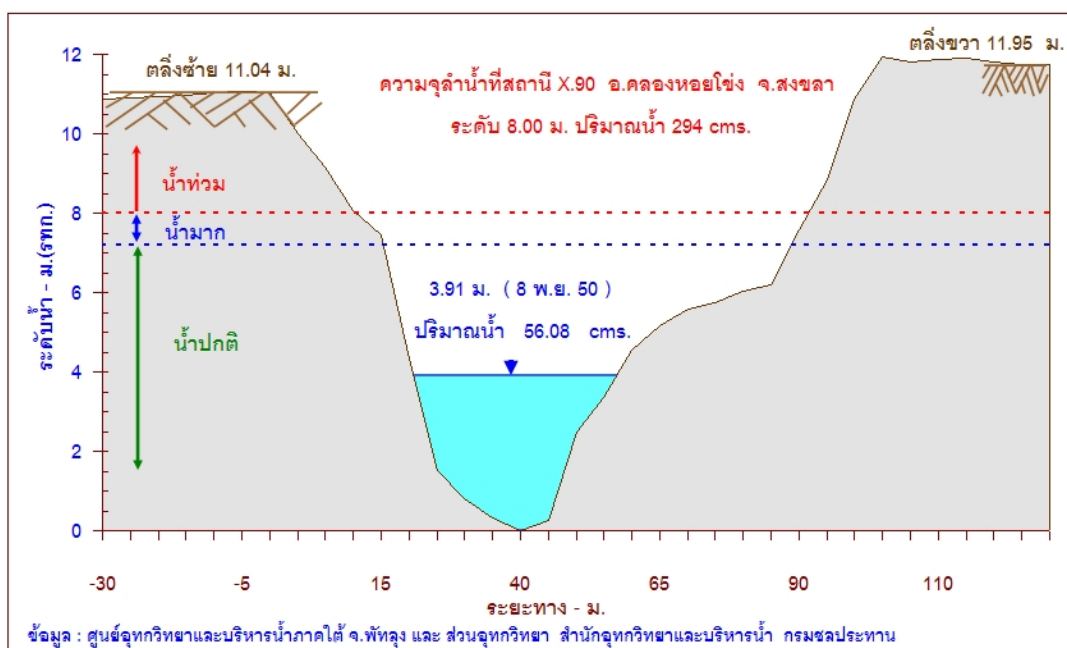


รูปที่ ข-6 สถานีบ้านม่วงก้อง (X.173A)

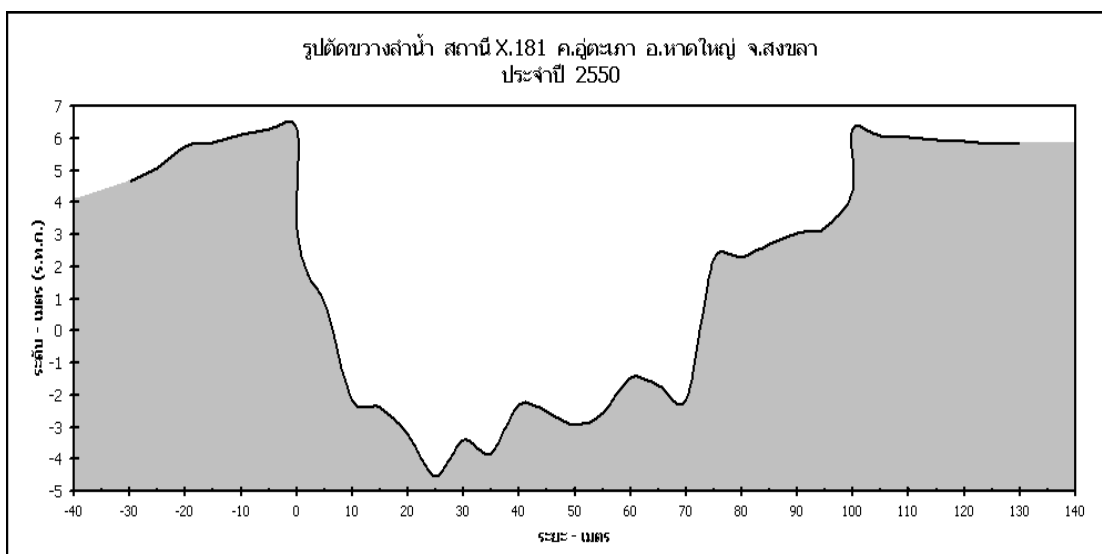
ภาคผนวก ข-8
ภาพตัดขวางคลองอุตะเถา



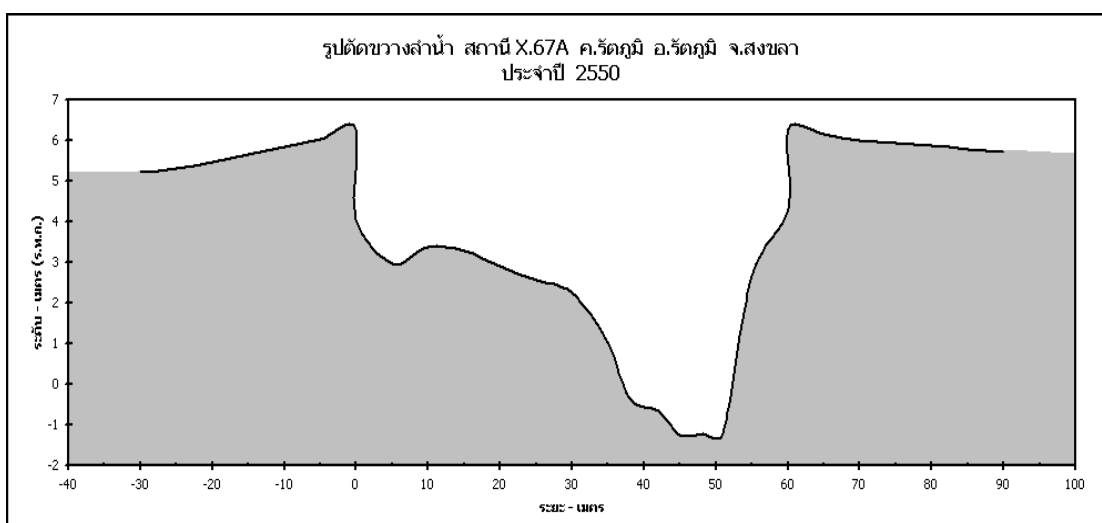
รูปที่ ข-7 สถานีบ้านหาดใหญ่ใน (X.44)



รูปที่ ข-8 สถานีบ้านบางศาลา (X.90)



รูปที่ ข-9 สถานีบ้านหาร (X.181)



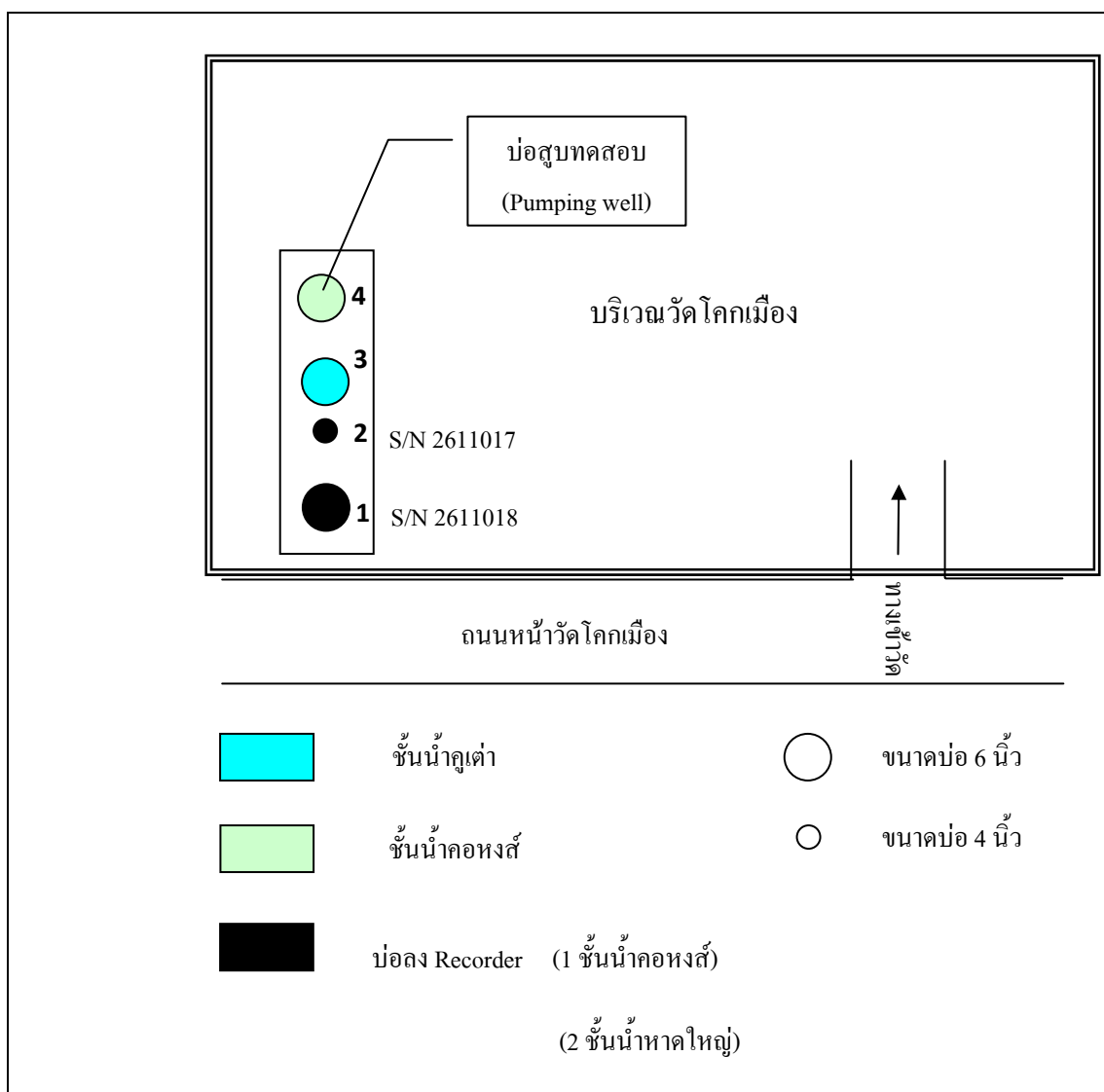
รูปที่ ข-10 สถานีคลองรัตภูมิ (X.67A)

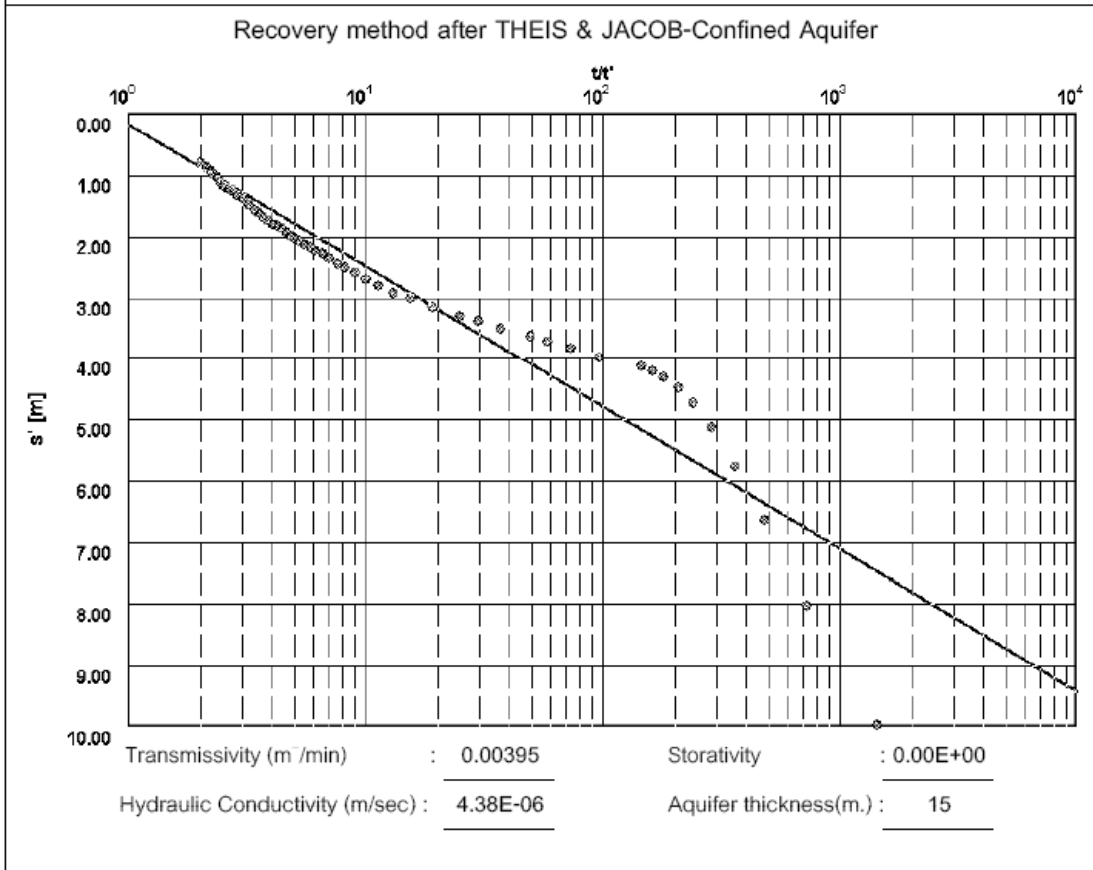
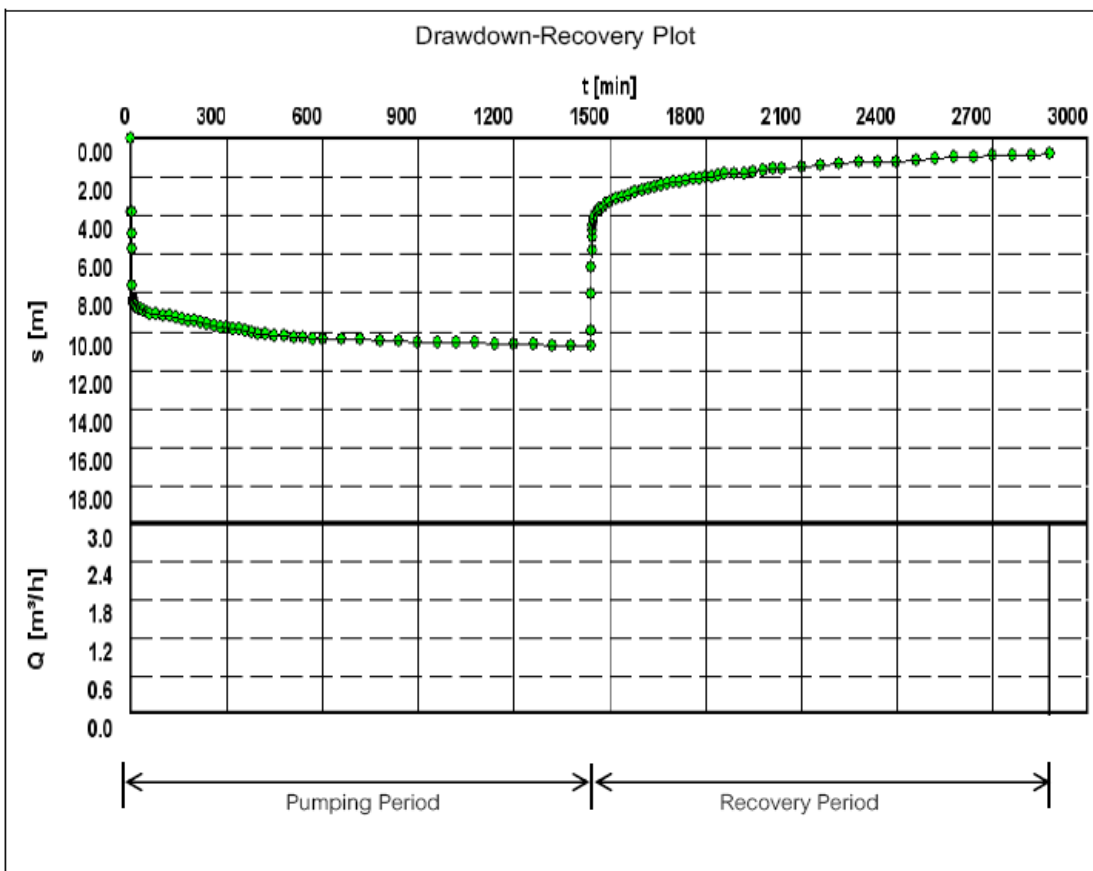
ภาคผนวก ค


ผลการสูบน้ำทดสอบในสนาม


หมายเลขบ่อ OW-1C (ชั้นน้ำคองกรี) สถานที่เจาะบ่อ วัดโคกเมือง หมู่ที่ 12
 ตำบล บางเหริย อำเภอ ควนเนียง จังหวัด สงขลา
 แผนที่ระหว่าง พิกัดตะวันออก 655801 พิกัดเหนือ 792470
 ความลึกเจาะ 114 เมตร ระยะท่อกรอง 102-106 ม. ชนิดท่อ เหล็ก ขนาด 6 นิ้ว
 ความยาวท่อรับทราย 3.00 ม. ปริมาณน้ำสูงสุด 5.0 ลบม./ชม. อัตราสูบ 3.0 ลบม./ชม.
 วัดปริมาณน้ำด้วย ถังน้ำขนาดความจุ 100 ลิตร ชนิดเครื่องสูบ Grundfos ขนาด 4 นิ้ว
 ทดสอบวันที่ 2 พฤษภาคม 2551 ระดับน้ำก่อนสูบ 2.47 ม. ระดับน้ำหลังหยุดสูบ 3.27 ม.

แผนที่แสดงตำแหน่งบ่อบาดาล





 Waterloo Hydrogeologic 180 Columbia St. W. Waterloo, Ontario, Canada ph: (519) 745-1758		Pumping test analysis Time-Drawdown plot with discharge		Date: 21.06.2008	PSU, Page 4
				Project: seawater intrusion into hat yai basin	
				Evaluated by: Arun Lookjan	
Pumping Test No. 1			Test conducted on: 2 May 2008		
Discharge 3.000 m ³ /h					
Static water level: 2.470 m below datum					
	Pumping test duration [min]	Water level [m]	Drawdown [m]		
1	0.00	2.470	0.000		
2	1.00	6.240	3.770		
3	2.00	6.300	3.830		
4	3.00	7.420	4.950		
5	4.00	8.220	5.750		
6	5.00	10.070	7.600		
7	6.00	10.770	8.300		
8	7.00	10.860	8.390		
9	8.00	10.960	8.490		
10	9.00	11.020	8.550		
11	10.00	11.080	8.610		
12	15.00	11.140	8.670		
13	20.00	11.220	8.750		
14	25.00	11.270	8.800		
15	30.00	11.340	8.870		
16	40.00	11.400	8.930		
17	50.00	11.460	8.990		
18	60.00	11.520	9.050		
19	80.00	11.560	9.090		
20	100.00	11.620	9.150		
21	120.00	11.670	9.200		
22	140.00	11.770	9.300		
23	160.00	11.840	9.370		
24	180.00	11.900	9.430		
25	200.00	11.950	9.480		
26	220.00	12.020	9.550		
27	240.00	12.080	9.610		
28	260.00	12.140	9.670		
29	280.00	12.220	9.750		
30	300.00	12.290	9.820		
31	320.00	12.340	9.870		
32	340.00	12.370	9.900		
33	360.00	12.420	9.950		
34	380.00	12.500	10.030		
35	400.00	12.560	10.090		
36	420.00	12.620	10.150		
37	450.00	12.670	10.200		
38	480.00	12.710	10.240		
39	510.00	12.740	10.270		
40	540.00	12.770	10.300		
41	570.00	12.820	10.350		
42	600.00	12.860	10.390		
43	660.00	12.880	10.410		
44	720.00	12.900	10.430		
45	780.00	12.930	10.460		
46	840.00	12.960	10.510		
47	900.00	13.010	10.540		
48	960.00	13.040	10.570		
49	1020.00	13.050	10.580		
50	1080.00	13.070	10.600		

 Waterloo Hydrogeologic 180 Columbia St. W. Waterloo, Ontario, Canada ph.(519)746-1798		Pumping test analysis Time-Drawdown plot with discharge		Date: 21.06.2008	PSU, Page 5	
				Project: seawater intrusion into hat yai basin		
				Evaluated by: Arun Lookjan		
Pumping Test No. 1			Test conducted on: 2 May 2008			
Discharge 3.000 m ³ /h						
Static water level: 2.470 m below datum						
	Pumping test duration		Water level		Drawdown	
	[min]		[m]		[m]	
51	1140.00	13.100	10.630			
52	1200.00	13.120	10.660			
53	1260.00	13.150	10.660			
54	1320.00	13.180	10.710			
55	1380.00	13.190	10.720			
56	1440.00	13.190	10.720			
57	1441.00	12.420	9.950			
58	1442.00	10.500	8.030			
59	1443.00	9.120	6.650			
60	1444.00	8.240	5.770			
61	1445.00	7.600	5.130			
62	1446.00	7.200	4.730			
63	1447.00	6.950	4.460			
64	1448.00	6.780	4.310			
65	1449.00	6.670	4.200			
66	1450.00	6.600	4.130			
67	1455.00	6.440	3.970			
68	1460.00	6.290	3.820			
69	1465.00	6.170	3.700			
70	1470.00	6.090	3.620			
71	1480.00	5.980	3.510			
72	1490.00	5.850	3.380			
73	1500.00	5.770	3.300			
74	1520.00	5.610	3.140			
75	1540.00	5.470	3.000			
76	1560.00	5.380	2.910			
77	1580.00	5.260	2.790			
78	1600.00	5.160	2.690			
79	1620.00	5.060	2.590			
80	1640.00	4.980	2.510			
81	1660.00	4.900	2.430			
82	1680.00	4.820	2.350			
83	1700.00	4.750	2.280			
84	1720.00	4.690	2.220			
85	1740.00	4.640	2.170			
86	1760.00	4.590	2.120			
87	1780.00	4.540	2.070			
88	1800.00	4.500	2.030			
89	1820.00	4.440	1.970			
90	1840.00	4.380	1.910			
91	1860.00	4.330	1.860			
92	1890.00	4.290	1.820			
93	1920.00	4.260	1.790			
94	1950.00	4.190	1.720			
95	1980.00	4.130	1.660			
96	2010.00	4.070	1.600			
97	2040.00	4.040	1.570			
98	2100.00	3.940	1.470			
99	2160.00	3.850	1.380			
100	2220.00	3.780	1.310			

ภาพการสูบทดสอบ



ปั้มน้ำสแตนเลส 4 นิ้ว ยี่ห้อ Grundfos



วัดระดับน้ำเริ่มต้น



วัดระยะน้ำลดขณะสูบ



อุปกรณ์วัดระดับน้ำ



อุปกรณ์ไฟฟ้า



ถังน้ำความจุ 100 ลิตร

ตาราง ค-1 คุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำจากการสูบน้ำแบบบ่อเดี่ยว (Single well), (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	สถานที่	ตำบล	อำเภอ	Time-Drawdown*		Recovery Test**		Average	
					T (m ² /min)	K (m/sec)	T (m ² /min)	K (m/sec)	T (m ² /min)	K (m/sec)
1	H0041	ธนาคารแห่งประเทศไทย	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.487	3.38E-04	0.495	3.44E-04	0.491	3.41E-04
2	H0042	โรงเรียนหาดใหญ่	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.31	2.15E-04	0.191	1.33E-04	0.251	1.74E-04
3	H0013	ประปาหาดใหญ่	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.279	3.88E-04	0.435	6.04E-04	0.357	4.96E-04
4	H0124	สถานีตำรวจตำบลควนลัง	ควนลัง	หาดใหญ่	1.028	9.56E-04	0.055	5.05E-05	0.541	5.03E-04
5	H0141	สนามกีฬาหาดใหญ่	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.168	3.11E-04	0.121	2.24E-04	0.145	2.68E-04
6	H0293	วัดคลองแห	คลองแห	หาดใหญ่	0.224	3.11E-04	0.231	3.21E-04	0.227	3.16E-04
7	H0294	สถานีวิทยุบ้านพรุ	บ้านพรุ	หาดใหญ่	0.019	2.06E-05	0.126	1.75E-04	0.072	9.78E-05
8	H0320	วัดเทพชุมนุม	บ้านพรุ	หาดใหญ่	0.080	2.22E-04	0.160	4.44E-04	0.120	3.33E-04
9	H0462	บ้านคลองหวะ	คอหงส์	หาดใหญ่	0.012	3.41E-05	0.003	7.64E-06	0.008	2.08E-05
10	H0487	โรงพยาบาลหาดใหญ่	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.141	1.56E-04	0.035	3.91E-05	0.088	9.77E-05
11	H0490	วัดโลกเทรียง	โคกม่วง	คลองหอยโข่ง	0.048	8.80E-05	0.032	5.90E-05	0.040	7.35E-05
12	H0955	วัดมงคลเทพาราม	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.134	3.73E-04	0.200	5.56E-04	0.167	4.64E-04
13	H0965	บ้านท่าแซะ	คลองอู่ตะเภา	หาดใหญ่	0.143	3.97E-04	0.101	2.81E-04	0.122	3.39E-04
14	H1039	บ้านทุ่งน้ำ	คลองแห	หาดใหญ่	0.498	1.38E-03	-	-	0.498	1.38E-03
15	H1040	บ้านในควน	ควนลัง	หาดใหญ่	0.129	3.58E-04	-	-	0.129	3.58E-04
16	H1167	สถานีตรวจสอบและเฝ้าฟังวิทยุ	ทุ่งตำเสา	หาดใหญ่	0.015	2.07E-05	0.010	1.32E-05	0.012	1.70E-05
17	H1202	วัดหาดใหญ่ใน	ควนลัง	หาดใหญ่	0.195	1.09E-03	0.031	1.70E-04	0.113	6.28E-04

ตาราง ค-1 คุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำจากการสุบทดสอบแบบบ่อเดี่ยว (Single well) (ต่อ) , (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	สถานที่	ตำบล	อำเภอ	Time-Drawdown*		Recovery Test**		Average	
					T (m ² /min)	K (m/sec)	T (m ² /min)	K (m/sec)	T (m ² /min)	K (m/sec)
18	H1204	มัสยิดอะลัมชะห์ (บ้านท่าคราม)	คลองแห	หาดใหญ่	1.201	3.34E-03	5.521	1.53E-02	3.361	9.31E-03
19	H1224	บ้านทุ่งตำเสา	ทุ่งตำเสา	หาดใหญ่	0.004	7.64E-06	0.004	7.29E-06	0.004	7.41E-06
20	TH0039	โรงเรียนบ้านหนองนายขุ้ย	คลองแห	หาดใหญ่	0.290	1.61E-03	0.305	1.69E-03	0.298	1.65E-03
21	TH0040	โรงเรียนวัดคลองแห	คลองแห	หาดใหญ่	0.273	7.58E-04	0.299	8.31E-04	0.286	7.94E-04
22	TH0041	บ้านคลองแห	คลองแห	หาดใหญ่	0.247	6.86E-04	0.262	7.28E-04	0.255	7.12E-04
23	TH0042	โรงเรียนบ้านทุ่งน้ำ	คลองแห	หาดใหญ่	0.363	1.01E-03	0.093	2.57E-04	0.228	6.33E-04
24	TH0045	บ้านหนองนายขุ้ย	คลองแห	หาดใหญ่	0.474	1.55E-04	0.535	1.75E-04	0.505	1.65E-04
25	TH0046	วัดบ้านดอน	คูเต่า	หาดใหญ่	0.017	4.65E-05	0.675	1.88E-03	0.346	9.61E-04
26	TH0052	โรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.053	2.54E-04	0.100	4.76E-04	0.077	3.65E-04
27	TH0057	ศาลาอเนกประสงค์บ้านพรุ	บ้านพรุ	หาดใหญ่	0.254	7.06E-04	0.227	6.31E-04	0.241	6.68E-04
28	TH0091	ศูนย์ประชาสัมพันธ์เขต 6	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.156	2.18E-04	0.771	1.08E-03	0.464	6.46E-04
29	TH0112	วัดหงษ์ประดิษฐาราม	คอหงส์	หาดใหญ่	0.005	6.83E-06	0.002	3.01E-06	0.004	4.86E-06
30	TH0352	หน่วยปฏิบัติการพิเศษ	ควนลัง	หาดใหญ่	0.058	1.20E-04	0.065	1.36E-04	0.061	1.28E-04
31	TH0353	โรงเรียนโคกหมา	ท่าช้าง	บางกล่ำ	0.193	4.02E-04	0.185	3.85E-04	0.189	3.94E-04
32	TH0367	โรงเรียนเทศบาล 1	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.146	2.43E-04	0.251	4.18E-04	0.199	3.31E-04
33	H0035	ศูนย์วิจัยการยางคอหงส์	คอหงส์	หาดใหญ่	0.030	2.22E-05	0.058	4.36E-05	0.044	3.30E-05
34	H0039	วัดคลองเรียน	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.002	9.26E-07	0.001	8.10E-07	0.002	9.26E-07

ตาราง ค-1 คุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำจากการสุบทดสอบแบบบ่อเดี่ยว (Single well) (ต่อ) , (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	สถานที่	ตำบล	อำเภอ	Time-Drawdown*		Recovery Test**		Average	
					T (m ² /min)	K (m/sec)	T (m ² /min)	K (m/sec)	T (m ² /min)	K (m/sec)
35	H0094	วัดโคกสมานคุณ	หาดใหญ่	หาดใหญ่	0.152	1.06E-04	0.124	8.61E-05	0.138	9.58E-05
36	H0142	โรงเรียนบ้านท่าไทร	คลองแห	หาดใหญ่	0.267	2.47E-04	0.210	1.94E-04	0.239	2.21E-04
37	H0853	โรงเรียนหาดใหญ่รัฐประชา	ควนลัง	หาดใหญ่	0.009	3.01E-05	0.007	7.52E-06	0.008	1.89E-05
38	H0907	โรงเรียนบ้านใต้	คูเต่า	หาดใหญ่	0.033	9.19E-05	0.281	7.81E-04	0.157	4.37E-04
39	H1203	มัสยิดบ้านควนเหนือ	คูเต่า	หาดใหญ่	0.400	2.22E-03	-	-	0.400	2.22E-03
40	H1223	บ้านทุ่งเลียบบ	ทุ่งตำเสา	หาดใหญ่	0.002	3.82E-06	0.019	3.53E-05	0.011	1.96E-05
41	H1246	บ้านบางโหนดนอก	คูเต่า	หาดใหญ่	0.000	1.74E-06	0.0003	1.16E-07	0.0004	9.26E-07
42	TH0037	วัดชัยชนะสงคราม	ควนลัง	หาดใหญ่	0.003	3.94E-06	0.001	1.27E-06	0.002	2.66E-06
43	TH0113	วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่	คอหงส์	หาดใหญ่	0.001	8.10E-07	0.001	8.10E-07	0.001	8.10E-07
44	TH0183	บ้านท่านางหอม	น่าน้อย	หาดใหญ่	0.008	9.03E-06	0.022	2.66E-05	0.015	1.78E-05
45	TH0244	วัดชลธาราวาส	บางกล่ำ	บางกล่ำ	0.003	4.05E-06	0.002	3.13E-06	0.003	3.59E-06
46	TH0324	บ้านเกาะม่วง	ทุ่งตำเสา	หาดใหญ่	0.004	2.66E-06	0.024	1.63E-05	0.014	9.49E-06
47	TH0410	สถานีอนามัยควนลัง	ควนลัง	หาดใหญ่	0.002	4.05E-06	0.001	2.89E-06	0.002	3.47E-06
48	TH0411	บ้านคลองเปล	คอหงส์	หาดใหญ่	0.000	2.31E-07	0.0003	2.31E-07	0.0003	2.31E-07
49	TH0001	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	คอหงส์	หาดใหญ่	0.002	1.97E-06	0.002	1.74E-06	0.002	1.85E-06
50	TH0002	โรงพยาบาลสงขลานครินทร์	คอหงส์	หาดใหญ่	0.004	3.59E-06	0.001	1.16E-06	0.003	2.31E-06

หมายเหตุ

* Cooper & Jacob method

** Theis & Jacob method

ตาราง ค-2 คุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำจากการสุบทดสอบแบบมีบ่อสังเกตการณ์, (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	สถานที่	ตำบล	อำเภอ	Theis Analysis		Time-Drawdown*		Recovery Test**	
					T (m ² /min)	K (m/sec)	T (m ² /min)	K (m/sec)	T (m ² /min)	K (m/sec)
1	TM478	โรงเรียนบ้านหน้าควน	บางเหรียญ	ควนเนียง	0.013	2.78E-06	0.009	1.97E-06	0.023	5.09E-06
	TM479	โรงเรียนบ้านหน้าควน	บางเหรียญ	ควนเนียง	0.002	9.26E-07	0.001	1.85E-06	0.001	4.63E-07
	TM480	โรงเรียนบ้านหน้าควน	บางเหรียญ	ควนเนียง	0.023	4.98E-06	0.013	2.78E-06	0.017	3.70E-06
2	TM481	วัดท่าเมรุ	คูเต่า	หาดใหญ่	0.127	2.65E-04	0.889	1.85E-03	0.833	1.74E-03
	TM483	วัดท่าเมรุ	คูเต่า	หาดใหญ่	0.343	9.53E-04	0.649	1.79E-03	0.567	1.57E-03
	TM482	วัดท่าเมรุ	คูเต่า	หาดใหญ่	0.191	1.05E-04	0.881	7.73E-04	0.474	4.15E-04
3	RCT216	วัดชัยชนะสงคราม	ควนลัง	หาดใหญ่	0.001	6.94E-07	0.0001	2.28E-05	0.002	5.09E-06
	RCT217	วัดชัยชนะสงคราม	ควนลัง	หาดใหญ่	0.001	1.39E-06	0.001	1.04E-06	0.002	4.05E-06
	RCT218	วัดชัยชนะสงคราม	ควนลัง	หาดใหญ่	0.001	4.17E-06	0.002	6.25E-06	0.002	4.86E-06
	RCT219	วัดชัยชนะสงคราม	ควนลัง	หาดใหญ่	0.002	4.86E-06	0.001	4.17E-06	0.002	5.09E-06
4	TH445	สำนักสงฆ์แก้วสว่างวราราม	คลองแห	หาดใหญ่	0.006	4.05E-06	0.004	2.78E-06	0.004	2.78E-06
	TH446	สำนักสงฆ์แก้วสว่างวราราม	คลองแห	หาดใหญ่	0.094	1.97E-04	0.068	1.41E-04	0.275	5.73E-04
	TH447	สำนักสงฆ์แก้วสว่างวราราม	คลองแห	หาดใหญ่	0.147	2.44E-04	0.281	4.68E-04	0.297	4.94E-04
	TH448	สำนักสงฆ์แก้วสว่างวราราม	คลองแห	หาดใหญ่	0.312	8.66E-04	0.310	8.61E-04	0.301	8.36E-04
5	TH441	อบต.ทุ่งตำเสา	ทุ่งตำเสา	หาดใหญ่	0.000	4.63E-08	0.002	1.85E-06	0.001	8.10E-07
	TH442	อบต.ทุ่งตำเสา	ทุ่งตำเสา	หาดใหญ่	0.001	2.43E-06	0.002	5.56E-06	0.001	1.62E-06

ตาราง ค-2 คุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำจากการสุบทดสอบแบบมีบ่อสังเกตการณ์ (ต่อ) , (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	สถานที่	ตำบล	อำเภอ	Theis Analysis		Time-Drawdown*		Recovery Test**	
					T (m ² /min)	K (m/sec)	T (m ² /min)	K (m/sec)	T (m ² /min)	K (m/sec)
6	TQ402	วัดดีหลวงนอก	ซิงโค	สิงหนคร	0.021	8.91E-06	0.044	1.82E-05	0.181	7.52E-05
	TQ403	วัดดีหลวงนอก	ซิงโค	สิงหนคร	0.111	2.47E-05	0.472	1.05E-04	0.343	7.63E-05
	TQ404	วัดดีหลวงนอก	ซิงโค	สิงหนคร	0.178	3.96E-05	0.173	3.84E-05	0.189	4.19E-05
	TQ405	วัดดีหลวงนอก	ซิงโค	สิงหนคร	0.269	1.12E-04	0.133	5.56E-05	0.172	7.18E-05
7	TH0120	โคกม่วง	โคกม่วง	คลองหอยโข่ง	0.043	1.18E-04	0.124	3.44E-04	0.201	3.72E-04
		โคกม่วง	โคกม่วง	คลองหอยโข่ง	0.116	2.14E-04	0.144	2.67E-04	1.076	2.00E-03
8	TH0045	บ้านหนองนายขี้	คลองแห	หาดใหญ่	0.007	9.72E-06	0.007	9.84E-06	0.0001	1.04E-06
	TH0039	บ้านหนองนายขี้	คลองแห	หาดใหญ่	0.008	4.66E-05	0.008	4.18E-05	0.0001	5.79E-07
	TH0255	บ้านหนองนายขี้	คลองแห	หาดใหญ่	0.007	2.88E-05	0.007	2.74E-05	0.0001	3.47E-07
9	TH0051	โรงเรียนสงขลาวิทยาคม	ซิงโค	สิงหนคร	0.004	1.06E-05	0.005	1.30E-05	0.0001	1.16E-07
	H0485	โรงเรียนสงขลาวิทยาคม	ซิงโค	สิงหนคร	0.008	1.55E-05	0.008	1.49E-05	0.0001	2.31E-07
10	H0589	บ้านป่ายาง	ท่าช้าง	บางกล่ำ	0.001	1.74E-06	0.001	2.20E-06	0.00001	2.31E-08
	H1225	วัดบ้านป่ายาง	ท่าช้าง	บางกล่ำ	0.001	4.05E-06	0.001	4.05E-06	0.00003	6.94E-08
11	PW	บ้านพรุ	บ้านพรุ	หาดใหญ่	0.024	6.70E-05	0.061	1.69E-04	0.403	1.12E-03
	OW	บ้านพรุ	บ้านพรุ	หาดใหญ่	0.131	3.62E-04	0.237	6.59E-04	0.118	3.28E-04

หมายเหตุ

* Cooper & Jacob method

** Theis & Jacob method

ภาคผนวก ง

ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลและระดับน้ำบาดาล

ตารางที่ ง-1 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำบาดาลใหญ่ครั้งที่ 1, (สิงหาคม 2550)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (^o C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	H0292	28.50	3.18	Nd.	Nd.	23.40	4.40
2	H0419	30.70	7.10	Nd.	Nd.	645.00	79.00
3	H0490	29.60	5.93	Nd.	Nd.	197.00	4.40
4	H0588	26.70	5.05	Nd.	Nd.	22.6	6.36
5	H0788	26.40	5.31	Nd.	Nd.	254	4.64
6	H1298	28.80	6.05	Nd.	Nd.	194	34.73
7	TH0042	28.80	3.50	Nd.	Nd.	62.4	19.08
8	TH0112	28.80	6.05	Nd.	Nd.	115	9.29
9	TH0362	26.80	2.82	Nd.	Nd.	19.5	2.45
10	TH0183	26.10	6.57	Nd.	Nd.	510	126.7
11	H0042	29.00	4.60	Nd.	Nd.	187	56.75
12	TH0446	Na.	Na.	Nd.	Nd.	Na.	Na.
13	TQ404	30.00	8.15	Nd.	Nd.	1614.00	692.23
14	OW-1a	Na.	Na.	Nd.	Nd.	Na.	Na.
15	OW-2a	Na.	Na.	Nd.	Nd.	Na.	Na.
16	OW-4a	27.10	5.34	Nd.	Nd.	4147.00	Nd.
17	OW-5a	29.00	7.49	Nd.	Nd.	4856.00	2480.29
18	OW-6a	28.40	8.54	Nd.	Nd.	257.00	15.41
19	GW-2	31.10	7.31	Nd.	Nd.	609	34.73
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5			600	250
เกณฑ์อนุโลมสูงสุด			6.5-9.2			1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-2 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำบาดาลใหญ่ครั้งที่ 2, (พฤศจิกายน 2550)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (⁰ C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	H0292	26.90	4.50	0.00	36.93	25.00	4.38
2	H0419	29.90	6.42	0.60	1267.00	862.00	140.36
3	H0490	28.60	6.77	0.10	284.00	193.00	8.74
4	H0588	27.90	4.81	0.00	627.76	19	4.38
5	H0788	28.40	6.50	0.00	137.20	93.3	6.8
6	H1298	28.00	7.78	0.20	447.10	304	3.89
7	TH0042	29.00	6.19	0.10	259.80	176	36.91
8	TH0112	28.10	5.51	0.10	316.80	215	2.91
9	TH0362	27.00	4.57	0.00	30.97	21	4.86
10	TH0183	28.40	7.06	0.30	707.80	481	130.65
11	H0042	27.60	5.37	0.10	303.80	207	66.05
12	TH0446	24.5	5.85	0	62.71	43	4.86
13	TQ404	29.30	6.95	1.40	2621.00	1782	713.44
14	OW-1a	29.6	6.82	0.1	368.2	250	5.83
15	OW-2a	28.2	6.39	0	131.3	90	2.43
16	OW-4a	27.90	6.38	0.50	1070.00	728.00	288.00
17	OW-5a	28.10	8.48	4.00	7268.00	4952	248.66
18	OW-6a	29.00	5.43	0.00	51.52	35.00	7.77
19	GW-2	30.60	7.72	0.40	904.50	615	35.94
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5	-	-	600	250
เกณฑ์อนุ โลมสูงสุด			6.5-9.2	-	-	1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-3 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำบาดาลใหญ่ครั้งที่ 3, (กุมภาพันธ์ 2551)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (⁰ C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	H0292	27.00	4.21	0.00	37.00	25.00	5.79
2	H0419	29.50	6.58	0.50	1170.00	975.00	125.85
3	H0490	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.
4	H0588	31.40	4.21	0.00	37.50	25.5	3.38
5	H0788	29.10	6.69	0.00	129.90	88.3	7.72
6	H1298	28.20	7.23	0.20	424.00	288	3.38
7	TH0042	30.00	5.91	0.10	255.00	173	38.09
8	TH0112	27.50	6.42	0.00	95.50	65	17.36
9	TH0362	26.90	4.55	0.00	26.50	18	2.41
10	TH0183	23.70	7.69	0.30	778.00	529	129.21
11	H0042	26.30	5.88	0.10	310.00	211	60.27
12	TH0446	26.4	5.59	0	56	38	3.38
13	TQ404	29.70	6.83	1.40	2782.00	1839	754.20
14	OW-1a	29.2	6.83	0.1	357	243	3.86
15	OW-2a	20.9	6.43	0	147.5	100	3.38
16	OW-4a	27.70	5.89	0.50	1037.00	705.00	239.61
17	OW-5a	29.30	8.21	4.00	7236.00	4920	2454
18	OW-6a	34.70	5.87	0.00	78.00	53.00	7.72
19	GW-2	29.70	7.97	0.40	907.00	616	35.68
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5	-		600	250
เกณฑ์อนุโลมสูงสุด			6.5-9.2	-		1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-4 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำบาดาลใหญ่ครั้งที่ 4, (พฤษภาคม 2551)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (⁰ C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	H0292	27.40	4.40	0.00	31.50	21.50	5.34
2	H0419	29.60	6.62	0.50	1160.00	786.00	121.65
3	H0490	28.30	7.40	0.10	232.00	158.00	7.77
4	H0588	30.50	4.73	0.00	2595.00	17.6	6.31
5	H0788	29.50	7.21	0.00	135.00	92	14.57
6	H1298	30.10	7.28	0.20	434.00	295	6.8
7	TH0042	29.90	6.55	0.10	250.00	170	35.94
8	TH0112	28.10	5.50	0.00	70.30	47.8	8.26
9	TH0362	27.10	4.64	0.00	28.65	19.4	5.58
10	TH0183	28.10	7.56	0.30	761.50	519	130.4
11	H0042	29.10	5.71	0.10	280.20	191	55.61
12	TH0446	31	5.79	0	59	40	5.34
13	TQ404	31.40	7.36	1.40	2720.00	1845.00	959.19
14	OW-1a	30.3	7.33	0.1	365	248	5.83
15	OW-2a	28.9	6.89	0	125	85	5.34
16	OW-4a	28.20	6.37	3.40	6160.00	4188.00	2112.64
17	OW-5a	30.40	8.03	3.80	6902.00	4690.00	2598.30
18	OW-6a	31.10	7.06	0.00	86.75	59.00	10.44
19	GW-2	31.20	7.61	0.40	840.00	571	33.75
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5	-	-	600	250
เกณฑ์อนุ โลมสูงสุด			6.5-9.2	-	-	1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-5 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำกู่เต่าครั้งที่ 1, (สิงหาคม 2550)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (⁰ C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	H0515	28.70	3.63	Nd.	Nd.	32.9	8.32
2	H0738	30.3	6.92	Nd.	Nd.	847	160.7
3	GW-3	Na.	Na.	Nd.	Nd.	Na.	Na.
4	H0447	31.50	6.98	Nd.	Nd.	962	68.49
5	TH0447	28.80	6.41	Nd.	Nd.	96.90	11.00
6	TM0482	28.00	6.91	Nd.	Nd.	185.00	36.20
7	OW-1b	28.10	5.42	Nd.	Nd.	137.00	3.91
8	OW-2b	27.40	4.77	Nd.	Nd.	233.00	3.91
9	OW-3b	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.
10	OW-4b	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.
11	OW-6b	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.
12	OW-7b	27.10	7.15	Nd.	Nd.	73.80	5.14
13	OW-8b	30.10	7.60	Nd.	Nd.	220.00	6.36
14	GW-1	28.50	6.21	Nd.	Nd.	138	19.08
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5	-	-	600	250
เกณฑ์อนุโลมสูงสุด			6.5-9.2	-	-	1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-6 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำกู่เต่าครั้งที่ 2, (พฤศจิกายน 2550)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (⁰ C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	H0515	30.30	5.23	0.10	255.50	174	0.97
2	H0738	30	6.42	0.6	1275	867	154.93
3	GW-3	30.9	6.43	0.2	469.7	319	84.51
4	H0447	31.20	6.68	0.70	1445.00	982	65.08
5	TH0447	27.40	6.14	0.00	152.00	103.00	6.80
6	TM0482	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.
7	OW-1b	29.60	8.35	0.00	181.90	124.00	6.80
8	OW-2b	28.20	7.39	0.20	436.80	297.00	4.38
9	OW-3b	28	7.49	0.2	578.6	391	43.71
10	OW-4b	28	8.65	0.2	453.2	308	100.05
11	OW-6b	28.5	8.94	0.1	233.5	159	11.17
12	OW-7b	28.50	8.15	0.00	109.50	75.00	5.83
13	OW-8b	28.90	8.46	0.10	349.00	237.00	7.29
14	GW-1	29.10	6.60	0.00	193.10	131	18.95
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5		-	600	250
เกณฑ์อนุโลมสูงสุด			6.5-9.2		-	1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-7 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำคูเต่าครั้งที่ 3, (กุมภาพันธ์ 2551)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (^o C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	H0515	34.60	6.41	0.10	287.00	195	3.38
2	H0738	28.4	7.06	0.6	1277	868	161.03
3	GW-3	30.6	6.42	0.2	455	310	88.23
4	H0447	31.10	6.52	0.70	1400.00	950	63.16
5	TH0447	28.00	6.37	0.00	158.00	108.00	4.34
6	TM0482	28.50	6.77	0.00	88.00	60.00	8.68
7	OW-1b	29.10	8.32	0.00	167.00	113.00	3.86
8	OW-2b	29.40	7.74	0.20	409.00	278.00	2.41
9	OW-3b	28.6	7.38	0.2	514.5	350	27.48
10	OW-4b	27.7	8.66	0.2	481.5	327	104.62
11	OW-6b	28.4	8.96	0.1	231	157	12.06
12	OW-7b	28.90	7.50	0.00	109.00	74.00	5.79
13	OW-8b	29.70	8.25	0.10	333.00	226.00	5.79
14	GW-1	26.90	5.88	0.00	200.00	136	16.88
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5	-	-	600	250
เกณฑ์อนุโลมสูงสุด			6.5-9.2	-	-	1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-8 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำคูเต่าครั้งที่ 4, (พฤษภาคม 2551)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (⁰ C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	H0515	29.40	7.38	0.10	292.00	198	3.88
2	H0738	30.3	7.18	0.6	1340	911	174.11
3	GW-3	30.8	6.61	0.2	481	326	88.39
4	H0447	29.80	6.67	0.70	1400.00	953	67.02
5	TH0447	29.50	6.21	0.00	117.30	80.00	6.31
6	TM0482	30.20	7.13	0.00	154.50	105.00	30.11
7	OW-1b	31.20	7.38	0.10	276.00	188.00	8.74
8	OW-2b	28.80	7.92	0.10	315.00	214.00	5.34
9	OW-3b	29.7	7.27	0.2	483	328	21.61
10	OW-4b	28.2	7.9	0.2	540	367	112.43
11	OW-6b	29.3	8.23	0.1	223.5	152	13.35
12	OW-7b	29.40	6.95	0.00	116.50	79.00	6.80
13	OW-8b	31.10	7.47	0.20	530.00	360.00	9.71
14	GW-1	30.10	6.94	0.00	188.00	128	21.12
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5	-	-	600	250
เกณฑ์อนุโลมสูงสุด			6.5-9.2	-	-	1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-9 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำคอกหงส์ครั้งที่ 1, (สิงหาคม 2550)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (⁰ C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	TH0265	28.90	7.51	Nd.	Nd.	595	122.3
2	TH0002	29.10	8.45	Nd.	Nd.	108	17.61
3	TH0445	Na.	Na.	Nd.	Nd.	Na.	Na.
4	TQ403	30.10	6.37	Nd.	Nd.	132.00	12.96
5	TM0482	28.40	6.74	Nd.	Nd.	60.90	1.71
6	RTC0217	29.90	6.33	Nd.	Nd.	445.00	3.42
7	OW-1c	28.50	5.60	Nd.	Nd.	154.00	3.42
8	OW-2c	27.10	4.53	Nd.	Nd.	305.00	3.18
9	OW-3c	26.90	6.41	Nd.	Nd.	655.00	192.26
10	OW-4c	27.40	5.46	Nd.	Nd.	2424.00	1218.13
11	OW-5c	28.80	8.17	Nd.	Nd.	376.00	69.47
12	OW-6c	28.60	7.65	Nd.	Nd.	236.00	11.00
13	OW-7c	28.30	7.23	Nd.	Nd.	144.00	8.32
14	OW-8c	30.60	7.88	Nd.	Nd.	225.00	7.34
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5	-	-	600	250
เกณฑ์อนุโลมสูงสุด			6.5-9.2	-	-	1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-10 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำคองสแตนท์ครั้งที่ 2, (พฤศจิกายน 2550)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (^o C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	TH0265	27.10	7.34	0.10	310.80	214	33.03
2	TH0002	25.50	6.20	0.00	113.20	77	14.57
3	TH0445	28.60	7.60	0.10	372.50	253	6.32
4	TQ403	29.10	7.74	0.00	112.00	76.00	8.74
5	TM0482	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.	Na.
6	RTC0217	28.40	7.28	0.20	512.00	349.00	8.26
7	OW-1c	29.80	7.62	0.10	254.10	173.00	6.80
8	OW-2c	28.00	7.70	0.20	421.60	287.00	2.91
9	OW-3c	28.00	8.24	1.70	3325.00	2262	1015
10	OW-4c	28.10	7.01	1.90	3660.00	2490	1151
11	OW-5c	28.40	5.58	0.40	975.50	663.00	211.75
12	OW-6c	28.30	8.75	0.10	347.20	236.00	14.09
13	OW-7c	28.10	8.61	0.00	170.10	116.00	6.80
14	OW-8c	28.60	8.77	0.10	312.00	212.00	7.77
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5	-	-	600	250
เกณฑ์อนุโลมสูงสุด			6.5-9.2	-	-	1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-11 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำคองสักรั้งที่ 3, (กุมภาพันธ์ 2551)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (⁰ C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	TH0265	27.60	7.74	0.10	383.00	260	37.13
2	TH0002	24.90	6.16	0.00	188.00	128	25.07
3	TH0445	28.60	7.38	0.10	378.50	257	6.75
4	TQ403	29.90	6.39	0.00	125.00	85.00	6.75
5	TM0482	28.50	6.77	0.00	88.00	60.00	8.68
6	RTC0217	29.60	7.17	0.30	713.00	485.00	7.23
7	OW-1c	29.50	8.03	0.10	254.00	172.00	5.79
8	OW-2c	30.40	7.98	0.20	406.50	276.00	2.41
9	OW-3c	28.90	8.08	1.50	3836.00	1928.00	826.84
10	OW-4c	28.00	7.57	1.90	3622.00	2463.00	1147.45
11	OW-5c	29.80	7.96	0.70	1515.00	1030.00	394.86
12	OW-6c	28.40	8.23	0.10	349.00	237.00	13.98
13	OW-7c	28.50	8.60	0.00	167.00	113.00	7.23
14	OW-8c	29.60	8.46	0.10	364.00	248.00	12.06
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5	-	-	600	250
เกณฑ์อนุโลมสูงสุด			6.5-9.2	-	-	1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-12 คุณภาพน้ำบาดาลของชั้นน้ำคองส์ครั้งที่ 4, (พฤษภาคม 2551)

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	Temp. (⁰ C)	pH	Salinity (ppt.)	Conductivity (uS/cm)	TDS (mg/L)	Chloride (mg/L)
1	TH0265	31.00	7.46	0.30	698.00	474	97.13
2	TH0002	28.50	6.94	0.00	158.00	107	24.28
3	TH0445	29.30	7.50	0.10	388.20	264	2.9
4	TQ403	30.40	7.54	0.00	150.00	102.00	14.57
5	TM0482	33.60	6.67	0.10	302.00	205.00	25.98
6	RTC0217	29.80	7.66	0.20	558.00	380.00	9.71
7	OW-1c	30.50	7.98	0.00	204.00	139.00	22.83
8	OW-2c	29.20	8.02	0.10	344.50	234.00	4.37
9	OW-3c	30.10	7.93	1.90	3600.00	2450.00	1384.14
10	OW-4c	28.60	7.48	1.90	3685.00	2508.00	1335.58
11	OW-5c	30.70	8.06	0.70	1567.00	1066.00	473.52
12	OW-6c	29.20	7.43	0.10	316.00	215.00	15.05
13	OW-7c	29.40	8.05	0.00	140.00	95.00	10.92
14	OW-8c	30.50	7.62	0.20	407.00	276.00	8.98
เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม			7.0-8.5	-	-	600	250
เกณฑ์อนุโลมสูงสุด			6.5-9.2	-	-	1,200	600

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

Nd. = ตัวอย่างไม่พอ

ตารางที่ ง-13 ระดับน้ำบาดาลของชั้นน้ำบาดาลใหญ่

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	ระดับน้ำจากผิวดิน (เมตร)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
1	H0292	7.00	Na.	Na.	7.85
2	H0419	5.00	Na.	6.85	Na.
3	H0490	Na.	2.4	2.65	Na.
4	H0588	4.70	4.50	4.75	5.45
5	H0788	4.80	0.37	0.60	0.85
6	H1298	Na.	1.82	2.15	2.7
7	TH0042	2.54	2.32	2.66	Na.
8	TH0112	0.80	0.65	Na.	1.60
9	TH0362	2.50	1.60	2.70	3.28
10	TH0183	10.50	9.68	10.00	9.90
11	H0041	11.00	Na.	11.74	12.06
12	TH0446	Na.	7.6	Na.	8.0
13	TQ404	5.80	5.52	5.44	5.80
14	OW-1a	Na.	2.1	2.58	2.6
15	OW-2a	Na.	8.47	10	9.86
16	OW-4a	2.15	3.00	3.40	2.45
17	OW-5a	2.80	2.50	2.92	2.90
18	OW-6a	6.50	4.37	5.18	5.70
19	GW-2	Na.	5.54	5.91	Na.

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

ตารางที่ ง-14 ระดับน้ำบาดาลของชั้นน้ำลูเต่า

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	ระดับน้ำจากผิวดิน (เมตร)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
1	H0515	4.40	4.10	5.40	Na.
2	H0738	Na.	Na.	5.9	8.85
3	GW-3	Na.	1.90	2.42	Na.
4	H0447	5.70	5.85	5.70	Na.
5	TH0447	6.00	5.85	6.30	6.80
6	TM0482	3.00	Na.	2.50	3.62
7	OW-1b	2.15	1.93	1.79	2.27
8	OW-2b	8.60	8.75	7.85	8.76
9	OW-3b	Na.	7.57	8.6	10.52
10	OW-4b	Na.	4.07	4.08	4.48
11	OW-6b	Na.	5.88	5.72	6
12	OW-7b	4.30	3.82	2.65	3.90
13	OW-8b	1.05	0.75	10.80	16.75
14	GW-1	Na.	2.04	2.44	Na.

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

ตารางที่ ง-15 ระดับน้ำบาดาลของชั้นน้ำคองหงส์

ลำดับ ที่	หมายเลข บ่อ	ระดับน้ำจากผิวดิน (เมตร)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
1	TH0265	5.20	4.60	5.00	4.96
2	TH0002	2.80	2.00	Na.	Na.
3	TH0445	Na.	7.07	5.70	7.43
4	TQ403	5.80	5.45	5.50	5.76
5	TM0482	3.00	Na.	2.50	3.50
6	RTC0217	26.50	17.26	23.00	17.00
7	OW-1c	2.10	1.85	1.53	1.96
8	OW-2c	8.60	8.46	7.58	8.70
9	OW-3c	7.00	9.00	8.75	10.88
10	OW-4c	3.60	3.50	3.50	3.90
11	OW-5c	7.00	6.75	6.80	7.00
12	OW-6c	8.00	6.42	6.30	6.33
13	OW-7c	3.90	3.82	2.02	2.90
14	OW-8c	1.00	0.76	12.60	22.34

หมายเหตุ

Na. = เก็บตัวอย่างไม่ได้

ภาคผนวก จ
ผลการทำ GPS Survey ในสนาม



รูปที่ จ-1 GPS-3394 (669108E 780854N)
Elevation 12.815 m. (MSL)



รูปที่ จ-2 GPS-3673 (680710E 791810N)
Elevation 6.70 m. (MSL)



รูปที่ จ-3 H0490 (654892E 759625N)
Elevation 19.769 m. (MSL)



รูปที่ จ-4 OW-8 (652276E 762207N)
Elevation 20.632 m. (MSL)



รูปที่ จ-5 H0042 (663017E 775446N)

Elevation 9.389m.(MSL)



รูปที่ จ-6 H0292 (660858E 774119N)

Elevation 7.017m.(MSL)



รูปที่ จ-7 TH0042 (663990E 782351N)

Elevation 3.293m.(MSL)



รูปที่ จ-8 OW-7 (648769E 777820N)

Elevation 57.525m.(MSL)



รูปที่ จ-9 0588 (657731E 780220N)

Elevation 3.866m.(MSL)



รูปที่ จ-10 OW-3 (657506E 784219N)

Elevation 3.087m.(MSL)



รูปที่ จ-11 GW-3 (662205E 785965N)
Elevation 2.430m.(MSL)



รูปที่ จ-12 GW-1 (663097E 787965N)
Elevation 2.200m.(MSL)



รูปที่ จ-13 TH0183 (668859E 786808N)
Elevation 5.010m.(MSL)



รูปที่ จ-14 OW-4 (661667E 784908N)
Elevation 3.082m.(MSL)



รูปที่ จ-15 TH0265 (669224E 799178N)
Elevation 2.662m.(MSL)



รูปที่ จ-16 H0419 (661002E 804878N)
Elevation 1.597m.(MSL)



រូបភាព ទ-17 GW-2 (662890E 803538N)
Elevation 1.629m.(MSL)



រូបភាព ទ-18 H0447 (664446E 805047N)
Elevation 1.976m.(MSL)



រូបភាព ទ-19 H0738 (665837E 806910N)
Elevation 3.886m.(MSL)



រូបភាព ទ-20 H1298 (654406E 789053N)
Elevation 7.370m.(MSL)



រូបភាព ទ-21 OW-1 (655784E 792461N)
Elevation 3.866m.(MSL)



រូបភាព ទ-22 H0788 (649257E 798919N)
Elevation 4.853m.(MSL)



รูปที่ จ-23 TH0002 (665417E 774333N)
Elevation 14.584m.(MSL)



รูปที่ จ-24 TH0362 (663003E 767490N)
Elevation 14.097m.(MSL)



รูปที่ จ-25 TH0112 (665382E 776062N)
Elevation 6.710m.(MSL)



รูปที่ จ-26 TH0445 (661747E 777528N)
Elevation 6.362m.(MSL)



รูปที่ จ-27 RTC217 (658425E 768138N)
Elevation 15.837m.(MSL)



รูปที่ จ-28 OW-6 (662523E 780346N)
Elevation 5.249m.(MSL)



รูปที่ จ-29 H0515 (653733E 765102N)

Elevation 18.828m.(MSL)



รูปที่ จ-30 OW-2 (648692E 784174N)

Elevation 32.778m.(MSL)



รูปที่ จ-31 OW-5 (658077E 782428N)

Elevation 3.561m.(MSL)



รูปที่ จ-32 TM482 (660495E 788372N)

Elevation 2.237m.(MSL)

ภาคผนวก ฉ
ข้อมูลการใช้น้ำบาดาล

ตาราง ฉ-1 สรุปปริมาณการใช้น้ำบาดาลของแอ่งหาคใหญ่

อำเภอ	ตำบล	อุปโภค-บริโภค	อุตสาหกรรม	เกษตรกรรม	โรงแรม	รวม (ลบม./ปี)
คลองหอยโข่ง	คลองหอยโข่ง	264,804	2,109	434,434		701,347
	โคกม่วง	332,935	21,957	51,923		406,815
	ทุ่งลาน	303,830	10,626	150,255		464,711
ควนเนียง	ควนโส	395,259	-	25,923		421,182
	บางเหรียญ	777,928	130,425	175,742		1,084,095
	รัตภูมิ	600,290	247,269	31,238		878,797
บางกล่ำ	ท่าช้าง	878,681	907,433	171,402		1,957,516
	บางกล่ำ	257,745	7,167	121,111		386,023
	บ้านหาร	197,907	-	37,009		234,916
	แม่ทอม	217,095	-	5,636		222,731
หาดใหญ่	คลองแห	776,887	59,556	-		836,443
	คลองอู่ตะเภา	209,919	12,340	5,712		227,971
	ควนลัง	1,806,827	2,335,653	-		4,142,480
	คูเต่า	1,049,961	883	85,185		1,136,029
	บ้านพรุ	515,821	2,541,534	57,134		3,114,489
	คอหงส์	1,643,230	596,237	-		2,239,467
	หาดใหญ่	1,923,550	830,865	-	1,319,039	4,073,454
สิงหนคร		625,610	1,884,130			2,509,740
รวม		12,778,279	9,588,184	1,352,704	1,319,039	25,038,206

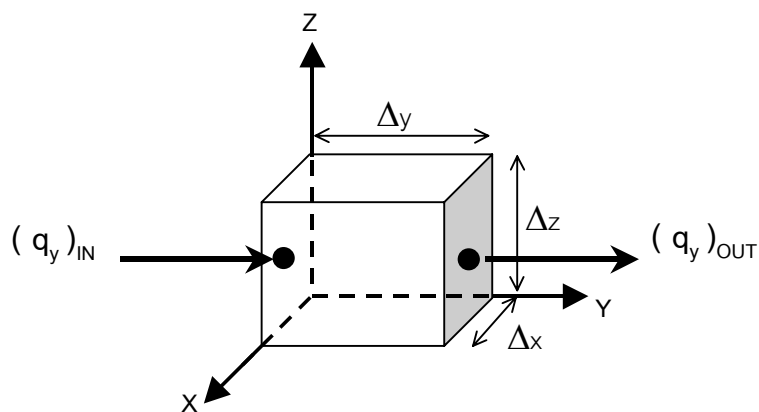
ที่มา : ดัดแปลงจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2549)

ภาคผนวก ข-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 $\Delta x \Delta y \Delta z$ จะได้สมการสุดท้ายคือ 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 ดังนั้น จะใช้สมการของดาร์ซีช่วยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่า 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) จากระบบต่อหน่วยปริมาตรของชั้นน้ำต่อหน่วยเวลาที่น้ำเข้าและ/หรือ ออก [T^{-1}] (กรณีจำลองการไหลออก R มีค่าเป็นลบ)
	t	=	เวลา [T]

ภาคผนวก ข-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 ของชั้นหินให้น้ำ [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 ($L^3 M^{-1}$)
 \bar{S} หมายถึงค่าความเข้มข้นทั้งหมดที่มีอยู่ในพื้นที่ (MM^{-1})

ภาคผนวก ข-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

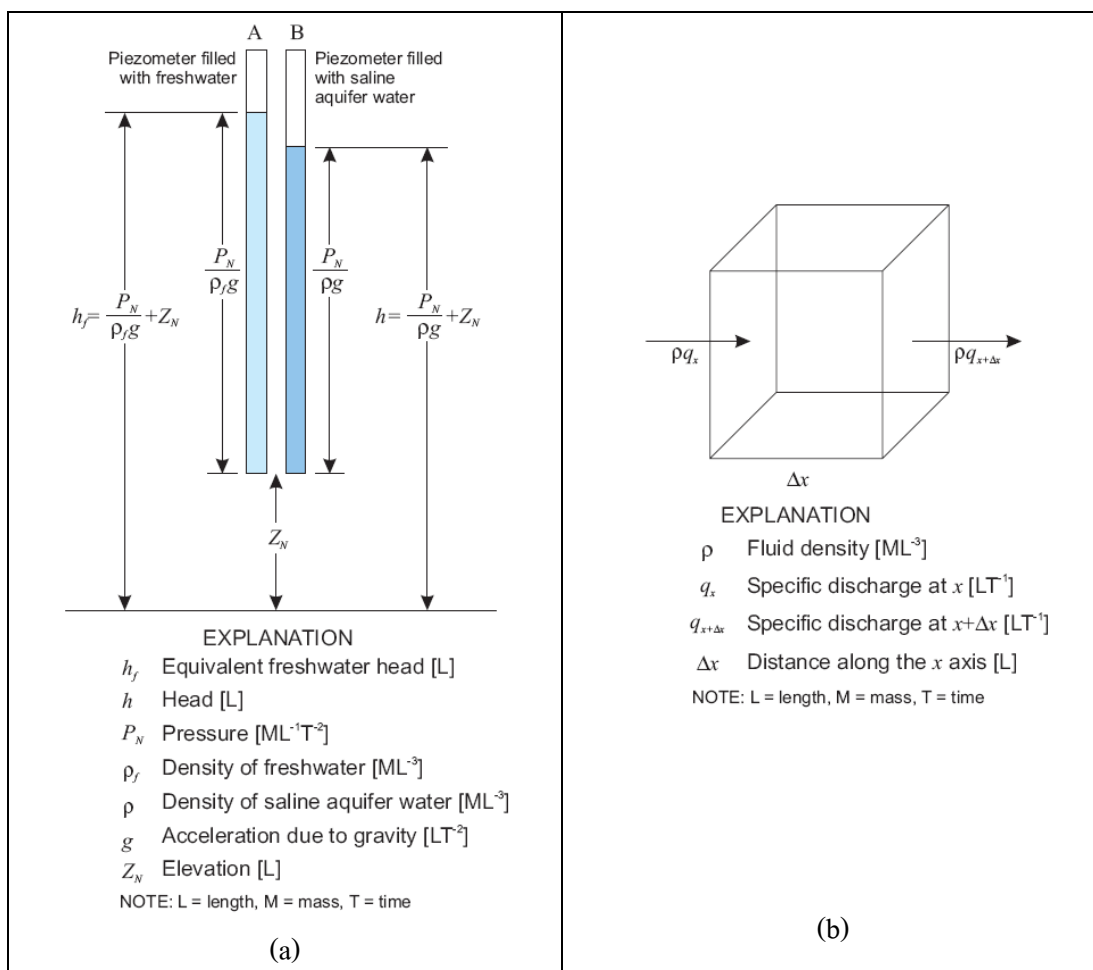
พิจารณารูปที่ ข-2a ประกอบด้วย Piezometer A เต็มน้ำจืดและ Piezometer B เต็มน้ำเค็ม ความแตกต่างของแรงดันน้ำใน Piezometer ทั้งสองสามารถแสดงความสัมพันธ์ในเทอมของแรงดันได้ดังสมการที่ (23) และ (24) และในเทอมของความหนาแน่นได้ดังสมการ (25) และ (26) ตามลำดับ

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

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

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

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



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

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

Governing Equation for Groundwater Flow

จากกฎทรงมวลของการไหลผ่านตัวกลางพรุน พิจารณารูปที่ ข-2b จะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกได้ดังสมการที่ (27)

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

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 $-\nabla \cdot (\rho \bar{q})$ บวกกับอัตราการสูญเสียน้ำ $\bar{\rho} q_s$ จากการซึมหรือการใช้น้ำ (Sink) หรือมีการเพิ่มเติมน้ำจาก 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) จะได้สมการที่ (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

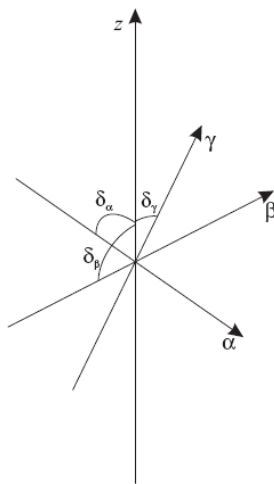
$$q_x = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (39)$$

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

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

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) สามารถหาค่าปริมาณน้ำสูญเสียน้ำเฉพาะ (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

$$\begin{aligned} E &= \text{ค่าคงที่ประมาณ } 0.7143 \\ C &= \text{ปริมาณความเข้มข้นของน้ำเค็ม [ML}^{-3}] \end{aligned} \quad (61)$$

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 ข

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. กรณีที่ปริมาณฝนน้อยกว่าศักยภาพการคายระเหยจะได้ปริมาณการเก็บกักเป็นแฟกเตอร์ (Factor) ของปริมาณการเก็บกักของเดือนที่ผ่านมา ซึ่งจากการทดลองของ Thornthwaite (Dingman, 1994) จะได้ค่าแฟกเตอร์เป็น $\exp(-((ETp_m - R_m)/S_{max}))$ 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 ($STREAM_y$)

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

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ ก

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 8 - 9 พฤษภาคม 2551

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6
8-9 พฤษภาคม 2551

คุณสมบัติของชั้นน้ำและคุณภาพน้ำใต้ดินในแอ่งหาดใหญ่ บริเวณทะเลสาบสงขลา

Aquifers Characteristic and Quality of Groundwater in the Vicinity Areas of the Songkhla Lake, Hat Yai Basin

อรุณ ลูกจันทร์¹ ธนิต เฉลิมยานนท์^{2*} จเรรัตน์ สกุศลรัตน์³
^{1,2,3}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
E-mail: Tanit.c@psu.ac.th

Arun Lookjan¹ Tanit Chalemmyanont^{2*} Jareerat Sakulrat³
^{1,2,3}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112
E-mail: Tanit.c@psu.ac.th

บทคัดย่อ

ชั้นน้ำบาดาลในแอ่งหาดใหญ่บริเวณเทศบาลนครหาดใหญ่ไปทางทิศเหนือจนถึงทะเลสาบสงขลาแบ่งได้เป็น 3 ชั้นได้แก่ ชั้นน้ำหาดใหญ่ (ลึกเฉลี่ย 20-40 ม.), ชั้นน้ำคูเต่า (ลึกเฉลี่ย 60-80 ม.) และชั้นน้ำคองหงส์ (ลึก >100 ม.) โดยพื้นที่รับน้ำ (Recharge Area) ได้แก่ เทือกเขาทางทิศตะวันออก-ตก และทิศใต้ และพื้นที่สูญเสีย (Discharge Area) ได้แก่ คลองอู่ตะเภา บริเวณกลางแอ่ง และทะเลสาบสงขลา คุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำหาดใหญ่โดยรวมมีคุณภาพดีแต่ไม่เหมาะสมสำหรับการบริโภคกล่าวคือ มีความขุ่น ปริมาณเหล็กและความกระด้างสูงกว่ามาตรฐานน้ำดื่ม ขอบเขตของน้ำเค็ม/กร่อยของชั้นน้ำหาดใหญ่พบในบริเวณติดกับทะเลสาบสงขลา รวม 3 ตำบล ได้แก่ ตำบลคูเต่า อำเภอหาดใหญ่ และตำบลบางกล้า ตำบลแม่ทอม อำเภอบางกล่ำเท่านั้น โดยชาวบ้านทั้ง 3 ตำบลนี้ใช้น้ำบาดาลจากชั้นน้ำคูเต่าที่ลึกลงไปที่มีความลึกประมาณ 70 เมตร (รทก.) ซึ่งมีคุณภาพดีกว่าชั้นน้ำหาดใหญ่ ส่วนคุณภาพน้ำบ่อในพื้นที่ติดกับทะเลสาบสงขลา มีความเค็มสูงจึงมีการใช้น้อย

คำหลัก แอ่งหาดใหญ่, คุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำ, การรุกคืบของน้ำเค็ม

Abstract

Groundwater aquifers in Hat Yai basin from Hat Yai municipality area to the Songkhla Lake can be divided into 3 aquifers namely Hat Yai aquifer (20-40 meters in depth) Khutao aquifer (60-80 meters in depth) and Kor Hong aquifer

(more than 100 meters in depth). The surrounding mountains in the east, the west and the south are the recharge areas where as the discharge areas are the U-Ta Pao river and the Songkhla Lake. In general, the quality of groundwater withdrawn from the Hat Yai aquifer is good but not suitable for drinking. Its turbidity, iron content and hardness are higher than standard drinking water. Saline groundwater in the Hat Yai aquifer is confined only in the vicinity areas of the Songkhla Lake namely: Kutao, Hat Yai district and Bangklam and Mae Tom, Bangklam district. Thus, in these areas, better groundwater from a deeper aquifer of Kutao, located about - 70 meters (MSL.) is used instead. Groundwater from dug wells surrounding the Songkhla Lake is hardly used by local people due to its high salinity.

Keywords: Hat Yai Basin, Aquifers Characteristic, Seawater Intrusion

1. บทนำ

อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลาเป็นเมืองศูนย์กลางทางธุรกิจท่องเที่ยว และการศึกษาของภาคใต้ตอนล่าง ความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและการขยายตัวของชุมชนเมืองในบริเวณอำเภอหาดใหญ่และพื้นที่รอบๆ ทำให้ปริมาณการใช้น้ำมากขึ้น ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการใช้ภายในครัวเรือน ในสปีทปีที่ผ่านมาน้ำบาดาลซึ่งถูกสูบมาใช้อย่างมากทำให้ระดับน้ำใต้ดินลดลง ทำให้มีน้ำจากริเวณรอบๆ ไหลมาเติมตามธรรมชาติ เช่น น้ำจากเขาคองหงส์ทางทิศตะวันออก จากเทือกเขาบรรทัดทางทิศตะวันตก

น้ำจากคลองอยู่ตะกั่ว รวมถึงความเป็นไปได้ในการไหลเติมของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาด้วยซึ่งอยู่ห่างจากเขตเทศบาลนครหาดใหญ่ในทางทิศเหนือประมาณ 10 กิโลเมตร ชาวบ้านซึ่งอยู่ติดกับทะเลสาบสงขลาพบว่าน้ำใต้ดินมีรสกร่อยและเค็ม โดยเฉพาะในชั้นน้ำหาดใหญ่ซึ่งเป็นชั้นน้ำชั้นแรกของแอ่งหาดใหญ่

แอ่งหาดใหญ่ครอบคลุมพื้นที่ในอำเภอหาดใหญ่ อำเภอคลองหอยโข่ง และบางส่วนของอำเภอบางกล่ำ จังหวัดสงขลา แอ่งหาดใหญ่ถูกล้อมรอบโดยเขาดอกหงส์ทางทิศตะวันออก เทือกเขาบรรทัดทางทิศตะวันตก เทือกเขาสันกาลาคีรีในทางทิศใต้ซึ่งติดกับชายแดนประเทศมาเลเซีย ส่วนทางทิศเหนือติดกับทะเลสาบสงขลา ในบริเวณพื้นที่ที่ติดกับทะเลสาบมีลักษณะของชั้นดินเป็นตะกอนน้ำพาและตะกอนตะกัณ้ำสูง [1]

อย่างไรก็ตาม การศึกษาการรุกของน้ำเค็มเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินในแอ่งหาดใหญ่และขอบเขตของการรุกกล้ำนั้น ยังไม่มีการทำวิจัยอย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาลักษณะการรุกของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาเข้าสู่แอ่งหาดใหญ่ในปัจจุบันในรูปแบบของขอบเขตและความรุนแรงของผลกระทบนี้ต่อคุณภาพของน้ำบาดาลในบริเวณนี้ เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปใช้ในการบริหารจัดการการใช้น้ำบาดาลในบริเวณพื้นที่บริเวณรอบทะเลสาบสงขลาอย่างบูรณาการ

2. คุณลักษณะของแอ่งหาดใหญ่

2.1 ขอบเขตที่ตั้ง

แอ่งหาดใหญ่เป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาตั้งอยู่บนพื้นที่ราบชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกของภาคใต้ วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 400 ตารางกิโลเมตร ในพื้นที่ อ.หาดใหญ่ อ.บางกล่ำ และ อ.คลองหอยโข่ง จ.สงขลา

ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปของแอ่งหาดใหญ่ เป็นที่ราบล้อมรอบด้วยภูเขาและพื้นที่ซึ่งเป็นที่เนินถึง 3 ด้าน คือ เทือกเขาบรรทัดทางทิศตะวันตก เทือกเขาสันกาลาคีรีทางด้านทิศใต้ ซึ่งเป็นชายแดนไทย-มาเลเซีย และทะเลสาบสงขลาด้านทิศเหนือ แอ่งหาดใหญ่เป็นที่ราบมีความสูงเฉลี่ยประมาณ 9 เมตร เหนือระดับทะเลปานกลาง ยอดเขาสูงที่สุดในบริเวณนี้คือ เขาคอหงส์ ซึ่งอยู่ทางด้านตะวันออกของแอ่งหาดใหญ่ และห่างจากตัวเมืองหาดใหญ่ประมาณ 6 กิโลเมตร มีความสูง 371 เมตร เหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง [2] ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 แหล่งน้ำบาดาลแอ่งหาดใหญ่

การศึกษาลักษณะชั้นดินและหินรวมทั้งข้อมูลของหลุมเจาะบ่อน้ำบาดาลในบริเวณแอ่งหาดใหญ่และเครื่องหยั่งธรณี สามารถแบ่งชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่นี้ได้เป็น 3 ชั้น [2] คือ

1) ชั้นน้ำหาดใหญ่ (Hat Yai aquifer) เป็นชั้นน้ำชั้นบนสุด มีความลึกประมาณ 20 - 50 เมตร มีความหนาของชั้นกรวดทรายเฉลี่ย 10 - 20 เมตร โดยความหนาแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ บริเวณตัวเมืองหาดใหญ่หนาประมาณ 20 - 40 เมตร ปกคลุมด้วยดินเหนียวหรือดินเหนียวปนทรายซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านได้เล็กน้อย ชั้นน้ำหาดใหญ่เป็นชั้นน้ำประเภทปราศจากแรงดัน (Unconfined

aquifer) ถึงถึงภายใต้แรงดัน (Semi-confined aquifer) การเพิ่ม



รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา บริเวณแอ่งหาดใหญ่

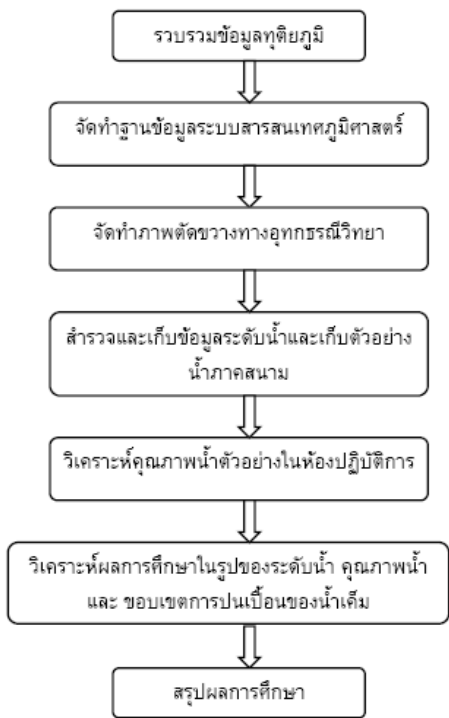
ของน้ำ (การเติมน้ำ) ในชั้นน้ำนี้ จะได้น้ำจากน้ำฝนซึ่งตกในพื้นที่รับน้ำของแอ่งหาดใหญ่โดยตรง ชั้นน้ำหาดใหญ่เป็นชั้นน้ำหลักของแอ่งหาดใหญ่ให้ปริมาณน้ำอยู่ในเกณฑ์เฉลี่ย 20 - 50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เป็นชั้นน้ำที่มีการพัฒนาขึ้นมาใช้มากที่สุด โดยใช้ในบ้านเรือน โรงแรม โรงงานอุตสาหกรรมและอื่นๆ บ่อน้ำบาดาลบางบ่อที่เจาะในชั้นนี้สามารถให้น้ำได้ถึง 150-200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตามเนื่องจากในบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่มีการสูบน้ำจากชั้นนี้ขึ้นมาใช้มาก จึงทำให้ระดับน้ำบาดาลของชั้นนี้ในบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่ลดลง น้ำบาดาลในชั้นน้ำหาดใหญ่จะไหลจากบริเวณรอบนอกเข้าสู่บริเวณตัวเมือง แต่ส่วนหนึ่งทางเหนือของเมืองหาดใหญ่ จะไหลลงสู่ทะเลสาบสงขลา ปัจจุบันพบว่ามีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้มากจนเกิดการรุกตัวของน้ำเค็มเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลชั้นนี้

2) ชั้นน้ำคูเต่า (Kutao aquifer) เป็นชั้นน้ำที่อยู่ลึกลงไปโดยมีความลึกประมาณ 60 - 100 เมตร และมีความหนาประมาณ 30 เมตร โดยมีดินเหนียวกั้นจากชั้นน้ำหาดใหญ่ เป็นชั้นน้ำที่มีแรงดัน (Confined aquifer) ประกอบด้วยชั้นกรวดทรายหลายชั้น(Multi-layer aquifer) และดินทรายปนดินเหนียวซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านได้ ชั้นน้ำนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้น้อยกว่าชั้นน้ำหาดใหญ่

3) ชั้นน้ำคอหงส์ (Korhong aquifer) เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดลงไปจากชั้นน้ำคูเต่า โดยมีดินเหนียวปิดทับอยู่ข้างบน อยู่ลึกลงไปจากผิวดินมากกว่า 100 เมตร เป็นชั้นน้ำที่มีแรงดัน (Confined aquifer) ประกอบด้วยชั้นกรวดทราย มีการคัดขนาด และความกลมมนดี โดยทั่วไป บ่อน้ำบาดาลที่เจาะในชั้นน้ำนี้จะให้น้ำน้อยกว่าบ่อน้ำบาดาลที่เจาะในชั้นน้ำ 2 ชั้นที่กล่าวมาแล้ว โดยสามารถให้น้ำได้ประมาณ 10 - 50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และมีการใช้น้ำในชั้นนี้มากกว่าน้ำบาดาลชั้นอื่น การเพิ่มของน้ำในชั้นนี้ได้จากการรั่วซึมของน้ำจากชั้นที่อยู่เหนือขึ้นไป

3. วิธีการศึกษา

การดำเนินงานวิจัยของการศึกษานี้ ประกอบด้วย 7 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงวิธีดำเนินงานวิจัย

4. ผลการศึกษา

4.1 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา

จากการรวบรวมข้อมูลชั้นดินชั้นหิน (Lithology) จากหลุมเจาะในพื้นที่ศึกษาจำนวน 442 บ่อ ซึ่งกระจายทั่วพื้นที่ประกอบด้วยข้อมูลหลุมเจาะบ่อบาดาลที่อยู่ในอำเภอหาดใหญ่จำนวน 273 บ่อ อำเภอบางกล่ำจำนวน 97 บ่อ อำเภอควนเนียงจำนวน 45 บ่อ อำเภอคลองหอยโข่งจำนวน 11 บ่อ อำเภอเมืองจำนวน 11 บ่อ และอำเภอนาหม่อมจำนวน 5 บ่อ จากนั้นกำหนดแนวตัดขวางตามแนวเหนือ-ใต้ 1 แนว และตามแนวตะวันตก-ตะวันออก 4 แนวภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนวเหนือ-ใต้ และแนวตะวันตก-ตะวันออกดังแสดงในรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 ตามลำดับ

ลักษณะชั้นน้ำในพื้นที่ศึกษาสามารถแบ่งเป็น 3 ชั้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสภา [2] คือ ชั้นน้ำหาดใหญ่ ชั้นน้ำคูเต่าและชั้นน้ำคอกหงส์ ในแต่ละชั้นประกอบด้วยทราย ทรายปนดินเหนียวและ กรวด โดยระหว่างชั้นน้ำมีชั้นดินเหนียวกันไว้ ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลไหลจากทิศใต้ไปทางทิศเหนือผ่านเมืองหาดใหญ่แล้วไหลลงสู่ทะเลสาบสงขลา (รูปที่ 3) และไหลจากทิศตะวันตก(เทือกเขาบรรทัด) และทิศตะวันออก (เขาคอกหงส์)ลงสู่

กลางแอ่งทั้งชั้นน้ำหาดใหญ่ คูเต่าและคอกหงส์ ในชั้นน้ำหาดใหญ่จะมีความหนาที่สุดบริเวณเมืองหาดใหญ่ (รูปที่ 4)

4.2 ระดับน้ำบาดาล

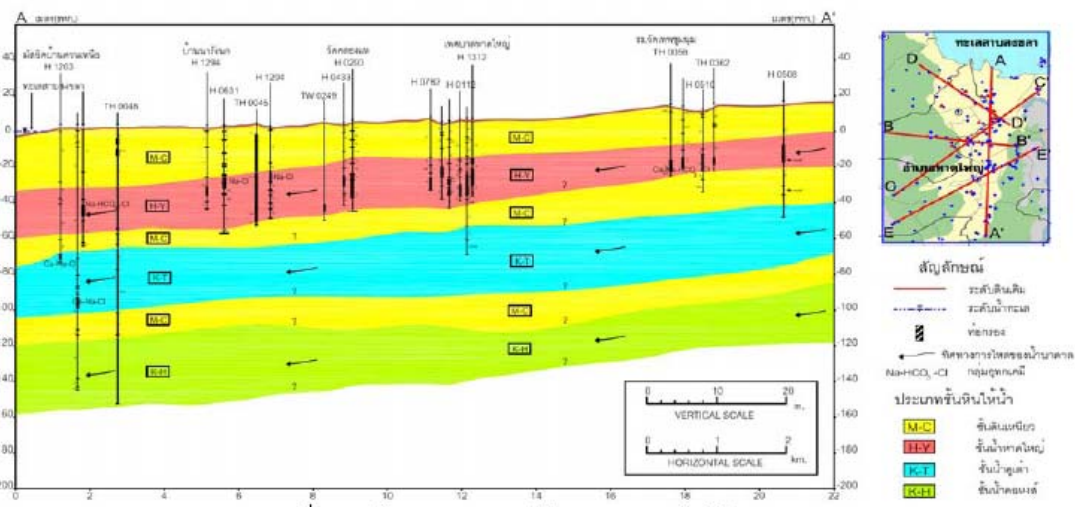
บ่อสังเกตการณ์ที่ทำการวัดระดับน้ำนี้เป็นบ่อน้ำบาดาลเดิมซึ่งเจาะโดยหน่วยงานของรัฐ โดยได้ดำเนินการวัดระดับน้ำทุก ๆ 2 เดือน จำนวน 6 ครั้ง เส้นชั้นความสูงของระดับน้ำบาดาลได้แสดงในรูปที่ 5 โดยภาพรวมพบว่าระดับน้ำใต้ดินจะสูงในทิศตะวันออก ทิศตะวันตกและทิศใต้และลดระดับลงตามสภาพภูมิประเทศ จนถึงคลองอู่ตะเภาและทะเลสาบสงขลา นอกจากนี้พบว่าระดับน้ำใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลคือ ระดับน้ำใต้ดินสูงในช่วงฤดูฝนและลดลงในช่วงฤดูร้อน ทั้งนี้โดยปกติบริเวณอำเภอหาดใหญ่จะมี Cone of depression เนื่องจากการสูบน้ำบาดาลมาใช้มาก แต่เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้เน้นศึกษาและเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลบริเวณรอบ ๆ ทะเลสาบสงขลา อีกทั้งบ่อน้ำบาดาลที่ศึกษาในบริเวณอำเภอหาดใหญ่มีน้อยไม่เพียงพอสำหรับการแสดง Cone of depression ในพื้นที่ศึกษาได้

4.3 คุณภาพน้ำ

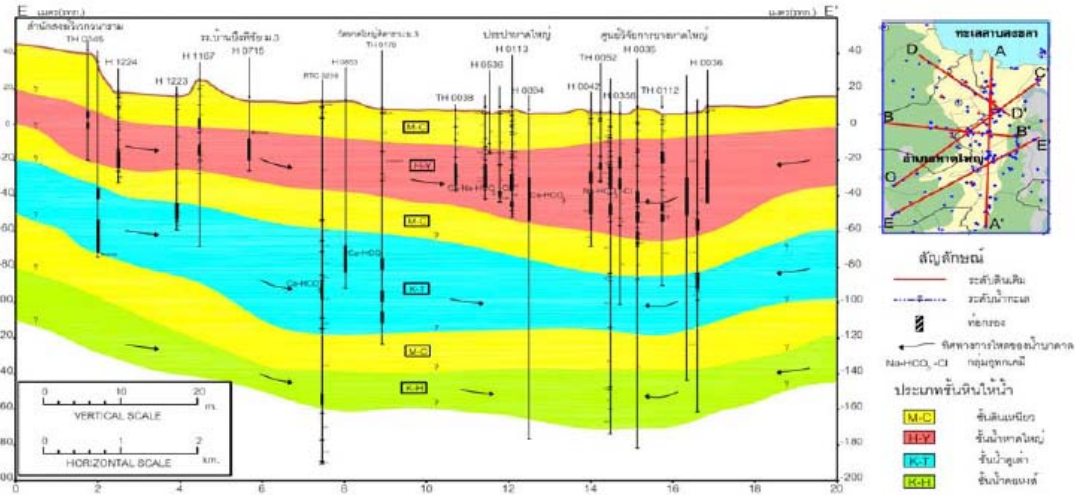
การติดตามคุณภาพน้ำโดยการเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อสังเกตการณ์จากบ่อน้ำบาดาลชั้นน้ำหาดใหญ่ 23 บ่อ และบ่อตื้น 6 บ่อ ทุก ๆ 2 เดือน จำนวน 6 ครั้ง ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO), การนำไฟฟ้า (Conductivity), ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids), ความขุ่น (Turbidity), ความเค็ม (Salinity), คลอไรด์ (Cl⁻), ซัลเฟต (SO₄²⁻), เหล็ก (Fe²⁺), แมงกานีส (Mn²⁺) และความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness) โดยผลการทดสอบคุณภาพน้ำตัวอย่างได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณภาพน้ำบาดาลและน้ำบ่อตื้นในพื้นที่ศึกษา

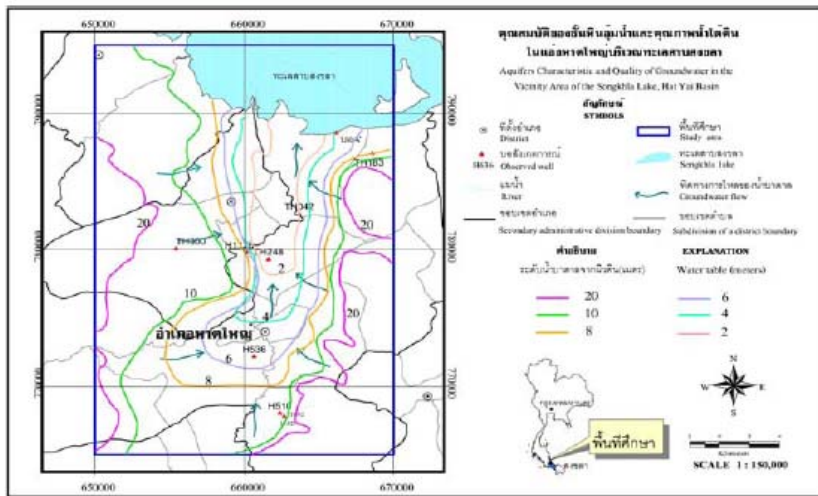
พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย		มาตรฐานน้ำบาดาลสำหรับบริโภค
	น้ำบาดาล	น้ำบ่อตื้น	
pH, mg/L	6.0	6.6	7-8.5
DO, mg/L	9.0	10.5	-
Conductivity, uS/cm	278	1,654	-
TDS, mg/L	191	1,127	<600
Turbidity, NTU	13	15	<5
Salinity, ppt	0.1	0.8	-
Cl ⁻ , mg/L	54	508	<250
SO ₄ ²⁻ , mg/L	9	108	<200
Fe ²⁺ , mg/L	2.3	2.2	<0.5
Mn ²⁺ , mg/L	0.4	0.8	<0.3
Total Hardness, mg/L	55	108	<300



รูปที่ 3 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนวเหนือ-ใต้ (A-A')



รูปที่ 4 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาตามแนวตะวันตก-ตะวันออก (E-E')



รูปที่ 5 เส้นชั้นระดับน้ำของบ่อบึงเขตการณ (กรกฎาคม 2549)

ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาลและน้ำบ่อตื้นจากชั้นน้ำบาดาลใหญ่ในพื้นที่ศึกษา พบว่า คุณภาพของน้ำจากบ่อตื้นเกิดการปนทุกบ่อไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของน้ำบาดาลสำหรับบริโภค ตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2542 [3] โดยปัญหาหลักของน้ำบาดาลที่พบคือ ค่า pH ที่อยู่ในสภาพเป็นกรดเล็กน้อย และในสภาพที่ค่อนข้างเป็นกรดและไร้ออกซิเจนนี้ เหล็กและแมงกานีสจะละลายน้ำได้ดี จึงทำให้มีปริมาณสูงกว่ามาตรฐานมาก อย่างไรก็ตามการรุกรานของน้ำเค็มในน้ำบาดาลอยู่ในปริมาณที่น้อยซึ่งไม่ทำให้น้ำมีรสเค็มจนเป็นปัญหาต่อการอุปโภคและบริโภคยกเว้นในพื้นที่ที่ติดกับทะเลสาบสงขลาซึ่งทั้งน้ำบาดาลและน้ำบ่อตื้นมีรสเค็ม

เมื่อพิจารณาคุณภาพน้ำตามฤดูกาลพบว่า โดยภาพรวมคุณภาพของน้ำใต้ดินในฤดูฝนดีกว่าคุณภาพน้ำในฤดูแล้งเนื่องจากน้ำฝนอาจเจือจางความเค็ม หรือ ช่วยดันน้ำเค็มที่รุกล้ำออกไปและละลายแคลเซียมคาร์บอเนตลงมาช่วยปรับสภาพน้ำให้เป็นกลางมากขึ้น

4.4 ขอบเขตและความรุนแรงของการรุกรานของน้ำเค็ม

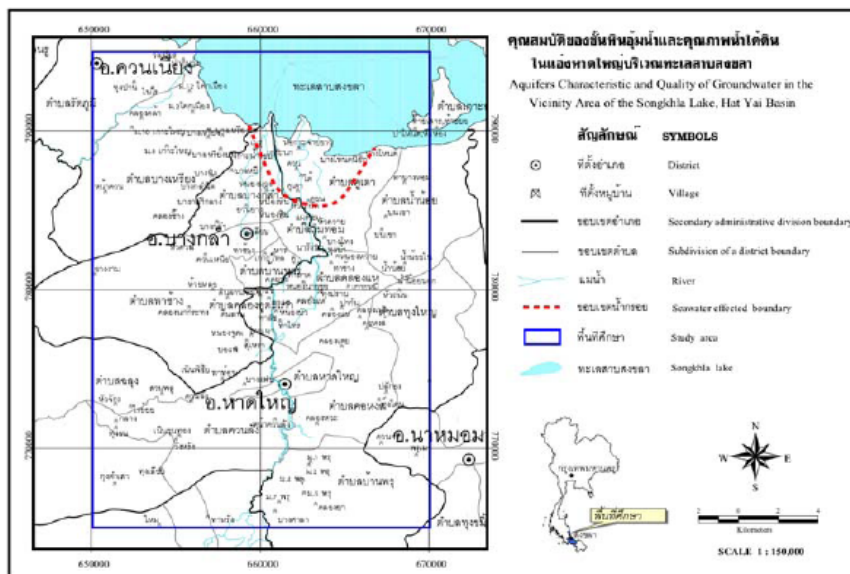
ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากบ่อตื้นเกิดการปนในพื้นที่ศึกษาในรูปของความเค็มและคลอไรด์ ทำให้ทราบว่าพื้นที่ชั้นน้ำบาดาลใหญ่ได้รับการปนเปื้อนจากน้ำทะเลสาบสงขลาจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลา โดยเป็นพื้นที่ที่อยู่เหนือเส้นประจนถึงทะเลสาบดังแสดงในรูปที่ 6 โดยพื้นที่ดังกล่าวครอบคลุมพื้นที่บ้านบางโหนด บ้านบางโหนดนอก บ้านหอกระเจาย่า บ้านเกาะนก บ้านควนเหนือ บ้านบ้านคูเต่า บ้านดอน ของตำบลคูเต่า อำเภอหาดใหญ่ บ้านห้วยอนวด ของ ตำบลแม่ทอม อำเภอบางกล่ำ และบ้านท่าเมรุ บ้านหนองม่วง บ้านหนองหิน ของ ตำบลบางกล่ำ อำเภอบางกล่ำ

4.5 รูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาล

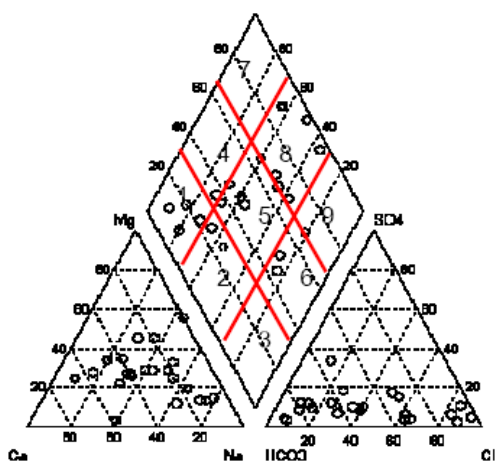
รูปแบบทางเคมีของน้ำตามการจัดกลุ่มของน้ำตามอนุมูลหลักทั้งกลุ่มไอออนบวกและไอออนลบที่พบ โดยไอออนบวกหลักในน้ำบาดาลคือ Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , และ Ca^{2+} ส่วนไอออนลบหลัก คือ Cl^- , SO_4^{2-} , และ HCO_3^- โดยปริมาณไอออนที่พบจะสัมพันธ์กับเส้นทางการไหลของน้ำ จากการศึกษารูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาล โดยใช้ Piper Diagram แสดงรูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาล โดยการพล็อตสัดส่วนของไอออนบวกแต่ละตัวในสามเหลี่ยมทางด้านซ้ายและไอออนลบในสามเหลี่ยมทางด้านขวา แล้วจึงโยงความสัมพันธ์ของทั้งสองด้านไปพล็อตในพื้นที่สามเหลี่ยมด้านบน และจากข้อมูลไอออนบวกและไอออนลบของน้ำตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษาสามารถสร้าง Piper Diagram ได้ดังรูปที่ 7

จาก Piper Diagram สามารถแบ่งรูปแบบทางเคมีของน้ำตัวอย่างในพื้นที่ศึกษาได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้

- 1)กลุ่มน้ำแคลเซียม-ไบคาร์บอเนต (1) และ กลุ่มน้ำแคลเซียม-โซเดียม-ไบคาร์บอเนต(2) อยู่ในพื้นที่ตำบลคลองคูเต่า ตำบลบางเหรียง ตำบลคลองสีย ตำบลหาดใหญ่ ตำบลควนลัง และ ตำบลบ้านพรุ ซึ่งเป็นพื้นที่ต้นน้ำ น้ำในบริเวณนี้จึงเป็นน้ำดี ไม่มีเค็ม และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้น้อยกว่า 100 มก. ต่อ ลิตร
- 2)กลุ่มน้ำแคลเซียม-ไบคาร์บอเนต-คลอไรด์ (4) และกลุ่มน้ำแคลเซียม-โซเดียม-ไบคาร์บอเนต-คลอไรด์ (5) เป็นกลุ่มน้ำบาดาลที่มีปริมาณสารเคมีต่างจากทางต้นน้ำแต่ยังไม่กร่อยหรือเค็ม อยู่ในพื้นที่ตำบลคลองแห ตำบลบ้านหาร
- 3)กลุ่มน้ำโซเดียม-คลอไรด์ (8, 9) และโซเดียม-ไบคาร์บอเนต-คลอไรด์ (6) พบบางส่วนในพื้นที่ตำบลแม่ทอม ตำบลบางกล่ำ และตำบลคูเต่า ซึ่งอยู่ใกล้ทะเลสาบสงขลา และสอดคล้องกับขอบเขตพื้นที่การรุกรานของน้ำเค็มในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขอบเขตการรุกรานของน้ำเค็มในพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 7 Piper Diagram ของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

5. สรุป

แอ่งหัดใหญ่อยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา วางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ ขอบแอ่งด้านทิศตะวันออก และทิศตะวันตกมีลักษณะเป็นเทือกเขาสูงวางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ พื้นที่ให้น้ำหลักของแอ่งหัดใหญ่อยู่บริเวณแนวเขาสูงทางทิศตะวันออก ทิศตะวันตกและทิศใต้ ส่วนพื้นที่รับน้ำคือพื้นที่ราบลุ่มตอนกลางของพื้นที่ แหล่งน้ำบาดาลหลักในพื้นที่คือ แหล่งน้ำบาดาลในตะกอนหินร่วน มีความลึกเจาะน้ำบาดาลตั้งแต่ 20-100 เมตร

ระดับน้ำบาดาลมีการเปลี่ยนแปลงแปรผันตรงกับลักษณะภูมิประเทศคือพื้นที่สูงระดับน้ำบาดาลจะอยู่ลึกได้แก่บริเวณตำบลหาดใหญ่ ตำบลควนลัง และ ตำบลบ้านพรุ ส่วนพื้นที่ลุ่มและอยู่ใกล้ทะเลสาบสงขลา ระดับน้ำบาดาลจะอยู่ตื้นได้แก่ บริเวณตำบลคูเต่า ตำบลแม่ทอม ตำบลบ้านหาร ตำบลคลองอยู่ตะกา ตำบลคลองแห และตำบลคอหงส์ ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลจะไหลจากขอบแอ่งด้านทิศตะวันออก ทิศตะวันตก และทิศใต้ ไปยังตอนกลางของพื้นที่ แล้วไหลต่อไปทางทิศเหนือ สู่ทะเลสาบ

คุณภาพน้ำบาดาลจากชั้นน้ำหัดใหญ่โดยรวมมีคุณภาพดี แต่ไม่เหมาะสำหรับการบริโภค กล่าวคือมีความขุ่น ปริมาณเหล็ก แมงกานีสและความกระด้าง สูงกว่ามาตรฐานน้ำดื่ม และมีความเป็นกรดเล็กน้อยแต่ไม่มีรสเค็ม ส่วนน้ำบ่อตื้นในบริเวณที่ใกล้กับทะเลสาบสงขลาพบว่า มีรสเค็ม

ผลศึกษาการแพร่กระจายของน้ำเค็มในรูปของความเข้มข้นของคลอไรด์และค่าความเค็มพบว่า น้ำบาดาลในชั้นน้ำหัดใหญ่ใกล้ทะเลสาบ บริเวณตำบลคูเต่า อำเภอหาดใหญ่ บางส่วนของตำบลแม่ทอม และตำบลบางกล่ำ อำเภอบางกล่ำ มีการปนเปื้อนหรือรุกราน้ำของน้ำเค็ม โดยชาวบ้านในพื้นที่หลีกเลี่ยงไปใช้น้ำจืดจากชั้นน้ำคูเต่าที่ความลึกประมาณ 70 เมตร

อย่างไรก็ตามการพบน้ำกร่อยหรือเค็มที่มีคลอไรด์สูงกว่าค่ามาตรฐานในชั้นน้ำหัดใหญ่บริเวณใกล้กับทะเลสาบสงขลานั้น ผลการศึกษาครั้งนี้ไม่สามารถชี้ชัดได้ว่า เกิดจากการรุกตัวของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลมาใช้ในปริมาณมากเกินไป เนื่องจากชาวบ้านและช่างเจาะบ่อบาดาลในพื้นที่ระบุว่า น้ำบาดาลในบริเวณพื้นที่ที่ศึกษาเป็นน้ำกร่อยมานานมากกว่า 30 ปีแล้ว และขอบเขตพื้นที่ที่พบน้ำเค็ม/กร่อย ก็ไม่ได้ขยายตัวตามปริมาณการสูบน้ำที่มากขึ้นของเทศบาลนครหาดใหญ่ ดังนั้นสมมุติฐานที่ว่า น้ำกร่อยหรือเค็มในชั้นน้ำหัดใหญ่บริเวณพื้นที่ติดกับทะเลสาบสงขลาเกิดจากการรุกของน้ำเค็มจึงยังไม่สามารถยืนยันได้ นอกจากนี้ยังเป็นไปได้ว่าน้ำกร่อยหรือเค็มดังกล่าวเป็นน้ำเค็มจากทะเลในอดีตที่ฝังตัวอยู่ในที่ ก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพทางธรณีวิทยาทำให้มีการทับถมของตะกอนจนกลายเป็นพื้นดิน ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการศึกษาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณอุดหนุนการวิจัยจากรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2548 และขอขอบคุณกรมทรัพยากรน้ำบาดาลโดยคุณคุณไต่ภิชญ์ ภิรมย์เลิศ สำหรับข้อมูลหลุมเจาะบ่อบาดาล

เอกสารอ้างอิง

- [1] วชิ รามณรงค์ และคณะ.2527.แผนที่ถูกธรณีวิทยาแอ่งหัดใหญ่ จังหวัดสงขลา. กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี.
- [2] สภา สกฤแก้ว. 2539. สภาพน้ำบาดาลบริเวณแอ่งหัดใหญ่ จังหวัดสงขลา. กรุงเทพฯ : ฝ่ายอุทกธรณีวิทยา กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี.
- [3] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2542) ออกตามความในพระราชบัญญัติน้ำบาดาลพ.ศ. 2520 เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกันด้านสาธารณสุขและป้องกันสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ดีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 112 ตอนที่ 29 ลงวันที่ 13 เมษายน 2542.

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ ข

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14
ศูนย์สมมนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 13-15 พฤษภาคม 2552



แบบจำลอง 3 มิติ การรุกค้ำของน้ำเค็มในแอ่งหาดใหญ่

THREE-DIMENSIONAL DENSITY-DEPENDENT SEAWATER INTRUSION

MODELING FOR THE HAT YAI BASIN

อรุณ ลุกจันทร์ (Arun Lookjan)¹

ธนิต เฉลิมยานนท์ (Tanit Chalermyanont)²

สุรพล อารีย์กุล (Surapon Arrykul)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ federun9@gmail.com

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ tanit.c@psu.ac.th

³รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ surapon.a@psu.ac.th

บทคัดย่อ : น้ำใต้ดินจากชั้นน้ำบาดาลใหญ่ซึ่งเป็นชั้นน้ำหลักของแอ่งหาดใหญ่ในบริเวณใกล้ทะเลสาบสงขลา มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน แบบจำลอง 3 มิติ ของการรุกค้ำของน้ำเค็มที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของน้ำถูกประยุกต์ใช้สำหรับแอ่งหาดใหญ่ เพื่อศึกษาการรุกค้ำของน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาและอ่าวไทยและประเมินผลกระทบของการสูบน้ำต่อการรุกค้ำของน้ำเค็ม กรณีที่มีการสูบน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นในช่วง 20 ปี โปรแกรม SEAWAT-2000 ซึ่งสามารถจำลองการไหลของน้ำและการเคลื่อนที่ของคลอไรด์โดยกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง แบบจำลองถูกปรับเทียบโดยใช้ระดับน้ำและความเข้มข้นของคลอไรด์จากบ่อสังเกตการณ์ 47 บ่อ ผลการจำลองพบว่า แอ่งหาดใหญ่เมื่อมีอัตราการสูบน้ำประมาณ 25 ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี และเพิ่มการใช้ขึ้นปีละ 5% ระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉลี่ย 2 เมตร โดยบริเวณเมืองหาดใหญ่ลดลงประมาณ 3.5-10 เมตร พื้นที่ที่มีการรุกค้ำของน้ำเค็มพบว่าเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้เมืองหาดใหญ่มากขึ้น

ABSTRACT: Chloride concentration of groundwater from Hat Yai aquifer, the major aquifer in the Hat Yai basin, was higher than groundwater standard. A three-dimensional density-dependent seawater intrusion model was applied for the Hat Yai basin in order to evaluate seawater intrusion from the Songkhla lake and the Gulf of Thailand and to predicted the effect of future increase of groundwater withdrawal in the next 20 years. SEAWAT-2000 with density-dependent groundwater flow and mass transport capability was used for modeling. The developed model was calibrated using hydraulic heads and chloride concentrations from 47 observation wells. Simulation results show that for the Hat Yai basin which having annual groundwater abstraction rate of about 25 million cubic meter per year, when the abstraction rate was increased 5% annually for the next 20 years, average groundwater drawdown of 2 meters was observed. Particularly, for Hat Yai city, groundwater drawdown was about 3.5-10 meter. In additions, seawater intrusion area was widely spread toward Hat Yai city.

KEYWORDS: SEAWAT, MT3DMS, Variable density, Seawater intrusion, Hat Yai basin, Safe yield

1. บทนำ

แหล่งน้ำบาดาลในแอ่งหัดใหญ่จัดเป็นแหล่งน้ำคุณภาพดีสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นน้ำดื่มได้ [1] จึงนิยมพัฒนามาใช้เป็นแหล่งน้ำดิบของอุตสาหกรรมต่างๆ ด้วยความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและการขยายตัวของชุมชนเมืองพบว่าปัจจุบันความต้องการใช้น้ำบาดาลจากแอ่งหัดใหญ่มีมากขึ้น โดยเฉพาะในเขตตัวเมืองหัดใหญ่ หากมีการสูบน้ำบาดาลมากกว่าปริมาณการกักเก็บ (Storage) จะทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลง หากระดับน้ำลดลงมากจนถึงระดับหนึ่งที่ไม่สามารถต้านแรงดันของน้ำเค็มจากทะเล ก็จะทำให้เกิดการแทรกดันตัวเข้ามาของน้ำเค็ม ทำให้แหล่งน้ำจืดถูกแทนที่กลายเป็นน้ำเค็มจนสุดท้ายไม่สามารถนำน้ำจากแหล่งน้ำนั้นมาใช้ได้อีกต่อไป

Ghyben และ Herzberg เสนอว่ารูกล้ำน้ำเค็มบริเวณชายฝั่งทะเลเป็นรูปสามเหลี่ยม (Seawater wedge) โดยน้ำจืดจะอยู่ด้านบนและน้ำเค็มอยู่ด้านล่าง เนื่องจากน้ำจืดมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำเค็มทำให้แนวเชื่อมต่อนี้เป็น Transition zone จากน้ำเค็มไปสู่น้ำจืด ความสัมพันธ์นี้ถูกใช้เพื่อประเมินความลึกตั้งแต่ชั้นน้ำจืดจนถึงน้ำเค็มเรียกว่าความสัมพันธ์แบบ Ghyben-Herzberg [2]

โดยทั่วไประยะการรุกของน้ำเค็มบริเวณชายฝั่งนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะ/คุณสมบัติชั้นน้ำ, อัตราการสูบน้ำ, ความลึกชั้นน้ำ, อัตราการเพิ่มเติมน้ำและระยะห่างจากบ่อสูบน้ำถึงชายฝั่ง เป็นต้น [3] และเนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์แบบ 3 มิติ โดยการนำกฎของดาร์ซี (Darcy's law) มาวิเคราะห์ร่วมกับสมการสมดุล (Continuity equation) ดังแสดงในสมการที่ 1 [4]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho K_{fx} \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho K_{fy} \left(\frac{\partial h_f}{\partial y} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_{fz} \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \right] = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + nE \frac{\partial C}{\partial t} - \rho q_z \quad (1)$$

เมื่อ K_{fx}, K_{fy}, K_{fz} คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนว x, y และ z [LT^{-1}], h_f คือ ระดับน้ำจืด (Equivalent freshwater head) [L], ρ คือความหนาแน่นน้ำเค็ม [ML^{-3}], ρ_f คือความหนาแน่นน้ำจืด [ML^{-3}], $\bar{\rho}$ คือความหนาแน่นของน้ำที่ไหลเข้า (Source, +) หรือไหลออก (Sink, -) [ML^{-3}], C คือความเข้มข้นของมวลสาร [ML^{-3}], q_z คือ ปริมาณน้ำเข้าหรือออกจากระบบต่อหน่วยปริมาตรของชั้นน้ำต่อหน่วยเวลา [T^{-1}], S_f คือค่าสปส.การกัก

เก็บน้ำ [L^{-1}], n คือความพรุนของวัสดุตัวกลาง, t คือ เวลา [T]

และ E คือความชัน $\frac{\partial \rho}{\partial C}$ (มีค่าประมาณ 0.7143 [5])

สมการที่ (1) เป็นสมการที่ใช้ใน SEAWAT-2000 สำหรับการจำลองการไหลกรณีความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Density-dependent) เทอมซ้ายมือคือ อัตราการไหลสุทธิที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุม ส่วนเทอมขวามือคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรกักเก็บในปริมาตรควบคุมรวมกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมวลสารต่อเวลา

ส่วนการเคลื่อนที่ของน้ำเค็มอธิบายด้วยหลักการอนุรักษ์มวลสาร (Principle of conservation of mass) ดังแสดงในสมการที่ 2 [6]

$$\frac{\partial (nC^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_j} [nD_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial X_j}] - \frac{\partial}{\partial X_j} [nV_j C^k] + q_z C_z^k + \sum_{k=1}^N R_k \quad (2)$$

เมื่อ C_k คือความเข้มข้นของมวลสาร k ที่ละลายในน้ำ [ML^{-3}], C_z คือความเข้มข้นของมวลสารที่ละลายในน้ำ ณ จุดที่เข้าสู่แหล่งน้ำ [ML^{-3}], D_{ij} คือ สปส.การแพร่กระจาย [L^2T^{-1}] ($D = D_m + D^*$, เมื่อ D^* คือ สปส.การแพร่ของตัวกลาง และ $D_m = \alpha_L \cdot v$ เมื่อ α_L คือการกระจายในแนวแกน [L]), V_j คือความเร็วของการไหล [LT^{-1}], q_z คืออัตราการไหลน้ำเข้าหรือออกจากระบบต่อหน่วยปริมาตรของชั้นน้ำ [T^{-1}], n คือความพรุนของวัสดุตัวกลาง, R_k คือ มวลที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในขณะที่มีการเคลื่อนที่ [$ML^{-3}T^{-1}$], X_j คือระยะทางการเคลื่อนที่ [L], t คือเวลา [T] และ $\frac{\partial C}{\partial t}$ คือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมวลสารต่อเวลา

สมการที่ (2) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของมวลสารในแต่ละหน่วยเวลา จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของมวลสารจากการแพร่กระจาย ลบด้วยอัตราการพามวลสารจากจุดนั้นบวกด้วยการเพิ่มเติมมวลสารเข้าไปในระบบหรือลบด้วยการไหลออกของมวลสารจากระบบ และรวมกับปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ที่มีผลทำให้มวลสารลดหรือเพิ่มปริมาณ หนึ่งหรือเร่งความเร็วในการเคลื่อนที่

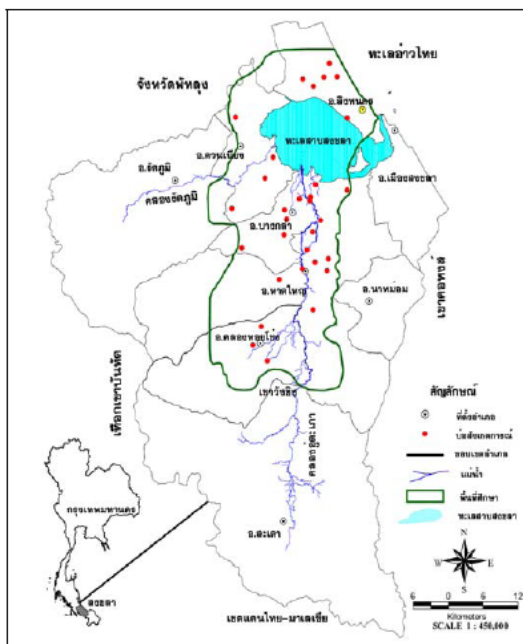
ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงถูกประยุกต์เพื่อใช้ในการคาดคะเนการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของน้ำเค็ม จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการไหลของน้ำใต้ดินและการรุกตัวของน้ำเค็มจากทะเลอ่าวไทยและทะเลสาบสงขลาสู่ชั้น

น้ำใต้ดินของแอ่งหาดใหญ่ในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบันและกรณีที่มีการสูบน้ำเพิ่มขึ้นในอนาคต โดยการใช้โปรแกรม 3 มิติ Visual MODFLOW 4.1pro [7] เพื่อกำหนดปริมาณการสูบน้ำที่เหมาะสม (Safe yield) ที่ไม่ก่อให้เกิดการรุกรานน้ำเค็ม

2. คุณลักษณะแอ่งหาดใหญ่

2.1 ขอบเขตที่ตั้ง

แอ่งหาดใหญ่เป็นแอ่งน้ำบาดาลขนาดย่อมเป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาตั้งอยู่บนพื้นที่ราบชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกของภาคใต้ วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ มีความลึกมากที่สุด 1 กิโลเมตร มีความยาว 60 กิโลเมตรและมีความกว้างประมาณ 20 กิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1,200 ตารางกิโลเมตร[8] ซึ่งรวม อ.หาดใหญ่ อ.บางกล่ำ อ.คลองหอยโข่ง อ.ควนเนียงและ อ.สิงหนคร จ.สงขลา ภูมิประเทศโดยทั่วไปของแอ่งหาดใหญ่เป็นที่ราบล้อมรอบด้วยภูเขาและพื้นที่ซึ่งเป็นที่เนินถึง 3 ด้าน คือ เทือกเขาบรรทัดทางทิศตะวันตก เขาคอหงส์ทางทิศตะวันออก เขาวังชิงทางด้านทิศใต้ และทะเลอ่าวไทยด้านทิศเหนือ บริเวณกลางแอ่งเป็นที่ราบสลับเนินเขา มีความสูงเฉลี่ยประมาณ 9 เมตร (รทก.) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

2.2 อุตทธรณีวิทยา

แอ่งหาดใหญ่มีลักษณะเป็นแอ่งที่ราบระหว่างหุบเขา บริเวณกลางแอ่งมีการสะสมตัวของตะกอนยุคควอเทอร์นารี น้ำบาดาลส่วนใหญ่ได้จากชั้นตะกอนหินร่วน (Unconsolidated sediment) ชั้นน้ำบาดาลแบ่งเป็น 3 ชั้น ชั้นน้ำหาดใหญ่ ชั้นน้ำคูเต่าและชั้นน้ำคอหงส์ตามลำดับ [9] ประกอบด้วยชั้นกรวดและทราย แต่ละชั้นน้ำถูกกั้นด้วยชั้นดินเหนียว (Aquitard) ที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้น้อยแต่กักเก็บน้ำไม่ได้

แอ่งหาดใหญ่มีภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน (Tropical monsoon climates) มีเพียง 2 ฤดู คือ ฤดูร้อน (กุมภาพันธ์ถึงเมษายน) ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้และฤดูฝน (พฤษภาคมถึงมกราคม) ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และตะวันออกเฉียงเหนือ [1] ปริมาณฝนเฉลี่ยของแอ่งหาดใหญ่จากข้อมูลน้ำฝนของกรมอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออกจากสถานีวัดน้ำฝนจำนวน 9 สถานี ระหว่างปี 2530-2550 เท่ากับ 1,583 มิลลิเมตร

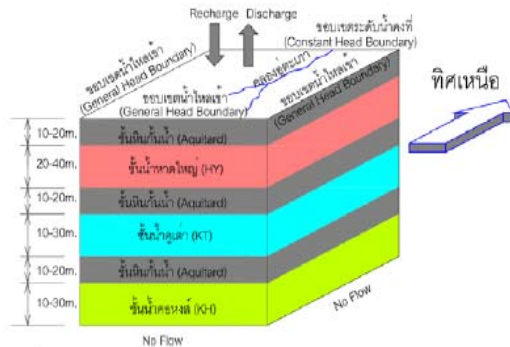
ทางน้ำธรรมชาติที่สำคัญในบริเวณแอ่งหาดใหญ่ คือ คลองอูตะเกา มีต้นกำเนิดจากเทือกเขาทางด้านทิศใต้ของแอ่งหาดใหญ่ ไหลตามแนวใต้ - เหนือ ผ่านทางด้านตะวันตกของตัวเมืองหาดใหญ่ ผ่านชุมชนต่าง ๆ ลงสู่ทะเลสาบสงขลาและคลองรัศมีมีต้นกำเนิดจากเทือกเขาทางด้านทิศตะวันตกแล้วไหลลงสู่ทะเลสาบสงขลา (รูปที่ 1)

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลอง 3 มิติเลือกใช้โปรแกรม Visual MODFLOW 4.1 Pro เป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์โดยวิธี Finite difference (explicit scheme) ประกอบด้วยโปรแกรม MODFLOW-2000 ใช้ในการจำลองการไหลของน้ำบาดาล และโปรแกรม MT3DMS ใช้ในการจำลองการรุกรานน้ำเค็ม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์

แบบจำลองเชิงมโนทัศน์คิดคือ ภาพรวมความเข้าใจของระบบการไหลน้ำบาดาลของพื้นที่ศึกษา ตามลักษณะธรณีวิทยา อุตทธรณีวิทยา สภาพภูมิประเทศ การใช้น้ำบาดาล สภาพดินและการใช้ที่ดิน ความซับซ้อนเหล่านี้สามารถออกแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ ได้ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองเชิงโมทิทัศน์

รูปที่ 2 แสดงธรณีวิทยาของแอ่งหัดใหญ่ แบ่งออกเป็น 6 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นหินกั้นน้ำ 3 ชั้นและชั้นหินอุ้มน้ำ 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นน้ำหัดใหญ่ ชั้นน้ำคูเต่าและชั้นน้ำคองหงส์ ตามลำดับ ชั้นล่างสุดเป็นชั้นหินแข็งโดยพิจารณาให้ไม่มีการซึมผ่านของน้ำในแนวตั้ง (No flow boundary) ส่วนทางทิศเหนือของแอ่ง (ทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย) พิจารณาให้ระดับน้ำได้ดินคงที่ตลอดเวลา (Constant head boundary) คลองอยู่เกาะและคลองรัศมิ พิจารณาให้เป็นขอบเขตแม่น้ำ (River boundary) ส่วนพื้นผิวดินบนแอ่งพิจารณาให้น้ำสามารถซึมผ่านลงไปได้ โดยกำหนดให้เป็นพื้นที่รับน้ำ (Recharge boundary) ขอบแอ่งด้านทิศตะวันตกและตะวันออกกำหนดให้เป็นขอบเขตที่มีน้ำไหลผ่าน (General head boundary) จากเทือกเขาบรรทัดและคองหงส์ตามลำดับ

3.2 การออกแบบกริดและช่วงเวลาการคำนวณ

แบ่งพื้นที่แบบจำลองเป็นกริดบล็อกขนาดเล็ก โดยแบ่งแนวตะวันออก-ตะวันตกเป็น 100 สดมภ์ (ช่องละ 350 เมตร) แนวเหนือ-ใต้เป็น 200 แถว (ช่องละ 300 เมตร) และแบ่งความสูงออกเป็น 12 ชั้น รวมทั้งหมด 240,000 กริดบล็อก ระดับพื้นดินในพื้นที่ศึกษาได้มาจากข้อมูลการสำรวจค่าระดับและพิกัดบ่อบาดาลจำนวน 47 บ่อ และการประเมินค่าในช่วง (Interpolate) จากข้อมูลเส้นชั้นความสูงระดับพื้นดินจากแผนที่ภูมิประเทศ ส่วนระดับด้านล่างของแต่ละชั้นน้ำ หาได้จากข้อมูลในรูปตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา ในการศึกษครั้งนี้กำหนดช่วงเวลาการคำนวณเป็นรายเดือนจำนวน 84 เดือน ส่วนช่วงเวลาการคำนวณซึ่งเป็นเวลาย่อยของช่วงเวลา กำหนดให้ 1 ช่วงเวลาของการคำนวณมี 5 ชั้นเวลาการคำนวณ คิดเป็น 420 ช่วงเวลา (Time

step) จำนวนวันจำลองเท่ากับ 2,555 วัน (พ.ศ. 2545-2551) จะได้ว่าใช้เวลา 1 ชั้น (Stress period) ประมาณ 6 วัน

3.3 การนำเข้าแบบจำลอง

การนำเข้าแบบจำลองประกอบด้วยข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

- 1) อัตราการใช้น้ำบาดาล (Pumping rate) จากการประเมินการใช้น้ำพบว่า แอ่งหัดใหญ่มีอัตราการใช้น้ำประมาณ 68,570 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (25.03 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี) [10]
- 2) บ่อสังเกตการณ์ (Observation well) แบ่งเป็นชั้นน้ำหัดใหญ่ 19 บ่อ ชั้นน้ำคูเต่า 14 บ่อและชั้นน้ำคองหงส์ 14 บ่อ รวม 47 บ่อ
- 3) ชนิดของชั้นน้ำ (Aquifer type) ชั้นหินอุ้มน้ำทั้ง 3 ชั้นเป็นชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (Confined aquifer)
- 4) คุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำ (Flow property) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, k) ซึ่งได้จากข้อมูลการสุบทดสอบของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล [1] และจากรายงานการศึกษาของ Spitz and Moreno (1996) [11] มาพิจารณาประกอบกัน และกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวตั้งต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวราบเท่ากับ 1:10
- 5) ระดับน้ำเริ่มต้น (Initial head) ระดับน้ำเริ่มต้นที่ใช้ในการจำลองใช้ค่าระดับแรงดันน้ำเฉลี่ยที่ได้จากการวัดในภาคสนาม ตั้งแต่สิงหาคม พ.ศ. 2550 ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2551
- 6) อัตราการเติมน้ำ (Recharge rate) พิจารณาจากปัจจัยที่มีผลต่อการเติมน้ำ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน (ช่วงข้อมูล พ.ศ.2530-2550) อัตราการระเหย ปริมาณน้ำท่า ลักษณะของดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน และความสูงค่าของภูมิประเทศ เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาพิจารณาร่วมกัน และทำการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ในการจำลองจะได้พื้นที่เติมน้ำ 4 โซน โดยได้แจกแจงอัตราการเติมน้ำให้อยู่ในช่วงที่ฝนตกชุก คือ เดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม โดยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝน และอัตราการคายระเหยในช่วงเวลานั้น
- 7) ขอบเขตระดับน้ำคงที่ (Constant head boundary) ได้แก่ ขอบเขตด้านเหนือซึ่งเป็นทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย โดยจำลองให้อยู่ชั้นบนสุดและกำหนดให้ค่าระดับน้ำคงที่ตลอดเวลาที่ 0 เมตร (รทก.)
- 8) ข้อมูลแม่น้ำ (River) ข้อมูลที่นำเข้าสู่แบบจำลองใช้จากสถานีวัดน้ำท่าลุ่มน้ำคลองอยู่เกาะและลุ่มน้ำคลองรัศมิ กรมชลประทาน 6 สถานี ได้แก่ X67, X194, X181, X44, X90 และ

X173a ข้อมูลประกอบด้วย ระดับน้ำในลำน้ำ ระดับท้องน้ำ ความหนาตะกอนท้องน้ำ ความกว้าง ความยาวลำน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตะกอนท้องน้ำในแนวดิ่ง (ช่วงข้อมูล พ.ศ.2547-2550)

9) ขอบเขตความเข้มข้นคงที่ (Constant concentration) ได้แก่ ขอบเขตด้านเหนือ ซึ่งเป็นแนวทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย โดยจำลองให้อยู่ชั้นบนสุดและกำหนดให้ค่าความเข้มข้นคงที่ตลอดเวลาเท่ากับ 18,000 mg/L ที่ทะเลอ่าวไทยและเท่ากับ 13,000-16,000 mg/L ที่ทะเลสาบสงขลา ตามลำดับ

10) ความเข้มข้นคลอไรด์เริ่มต้น (Initial chloride concentration) ความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นที่ใช้ในการจำลอง ใช้ค่าปริมาณคลอไรด์เฉลี่ยที่ได้จากการวัดในภาคสนามตั้งแต่สิงหาคม พ.ศ. 2550 ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2551

11) สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินในน้ำ (Dispersivity, α) ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวราบและแนวดิ่ง โดยอ้างอิงจากชนิดของหินจากการศึกษาของ Spitz and Moreno (1996) [11] ค่าการแพร่กระจายในแนวดิ่งมีค่าประมาณ 10% ของการแพร่กระจายในแนวราบ

3.4 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

3.4-1 การไหลของน้ำบาดาลในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

พารามิเตอร์ที่มีการปรับค่าได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำและอัตราการเพิ่มเติมน้ำ โดยตั้งเกณฑ์ความแตกต่างของระดับน้ำด้วยค่าความเบี่ยงเบนคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) ไว้ที่ร้อยละ 10 นั่นคือถ้าผลต่างระดับน้ำที่คำนวณได้กับที่วัดได้ในสนามมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ถือว่าผลการจำลองนั้นเป็นที่ยอมรับได้ ผลการเปรียบเทียบได้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำดังแสดงในตารางที่ 1 และอัตราการเพิ่มเติมน้ำพบว่าอยู่ในช่วง ประมาณ 1- 12% ของปริมาณฝนเฉลี่ยรายปี

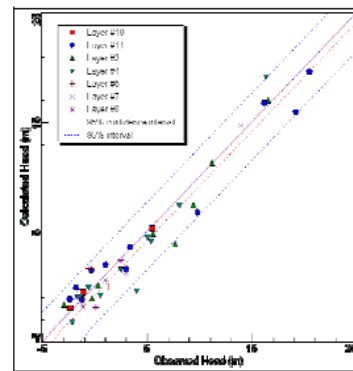
ผลการเปรียบเทียบพบว่า แบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 6.770 (RMS =1.582m). ดังแสดงในรูปที่ 3

3.4-2 การแพร่กระจายของน้ำเค็ม

พารามิเตอร์ที่มีการปรับค่าได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำ (Longitudinal dispersivity, α_L) พบว่า

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

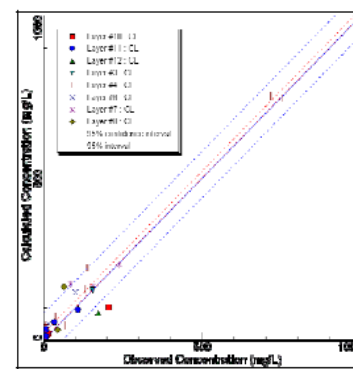
ชั้นน้ำ/พารามิเตอร์	หาดใหญ่	คูเต่า	คอกหงส์	ดินเหนียว
Kx=Ky, m/s	5.67e-05	4.75e-05	2.32e-05	2e-08
Kz, m/s	5.67e-06	4.75e-06	2.32e-06	2e-08
Specific storage, Ss	4.9e-04	0.0002	0.0001	0.02
Specific yield, Sy	0.25	0.20	0.20	0.03
Effective Porosity	0.27	0.24	0.25	0.03
Total porosity	0.39	0.32	0.24	0.42



รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนแบบจำลอง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวราบชั้นดินเหนียวเท่ากับ 1 เมตร ชั้นน้ำหาดใหญ่ 15 เมตร ชั้นน้ำคูเต่า 12 เมตรและชั้นน้ำคอกหงส์ 10 เมตร ตามลำดับ ในการเปรียบเทียบได้ตั้งเกณฑ์ความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ด้วยค่าความเบี่ยงเบนคลาดเคลื่อน (Normalized RMS) ไว้ที่ร้อยละ 10

ผลการเปรียบเทียบพบว่า แบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือได้ค่าความเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อนร้อยละ 5.039 (RMS = 37.765 mg/L) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนแบบจำลอง

3.4-3 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง

a) การจำลองการไหล

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นหินให้น้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะและอัตราการเพิ่มเติมน้ำ โดยการปรับค่าเพิ่มขึ้นและลดลงร้อยละ 10 พิจารณาค่า Normalized RMS พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแบบจำลองมากที่สุดคือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ อัตราการเพิ่มเติมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะ ตามลำดับ

b) การจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็ม

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำ (Longitudinal dispersivity, α_L) โดยการปรับค่าเพิ่มขึ้นและลดลงร้อยละ 10 เปรียบเทียบกับค่า Normalized RMS พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของหินอุ้มน้ำมีผลต่อแบบจำลองน้อย

4. ผลการจำลอง

4.1 การไหลของน้ำใต้ดิน

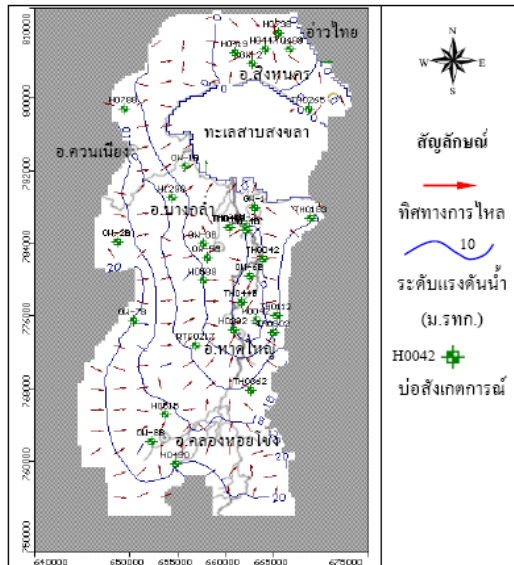
ผลจากจำลองการไหลแบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่า ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลโดยทั่วไปจะไหลจากพื้นที่เดิมน้ำทางทิศตะวันตก (เทือกเขาบรรทัด) และทิศตะวันออก (เขาคอหงส์) มายังพื้นที่รับน้ำบริเวณกลางแอ่ง รวมถึงน้ำจากทิศใต้ (เขาวังชิง) แล้วไหลลงสู่ทะเลสาบสงขลา (รูปที่ 5) นอกจากนี้ยังพบว่าทิศทางการไหลไปยังกรวยน้ำลด ซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีการสูบน้ำมาก โดยเฉพาะบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่ ส่วนทางทิศเหนือบริเวณอำเภอสิงหนคร พบว่ามีกรวยน้ำลดไปยังทะเลสาบสงขลาและอ่าวไทย

4.2 การรุกคืบของน้ำเค็ม

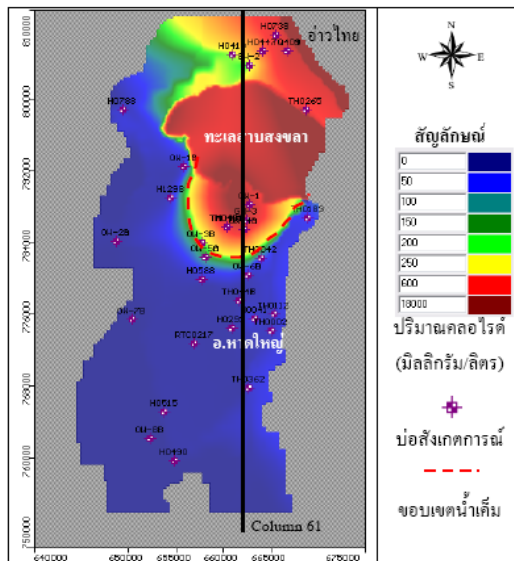
ผลการจำลองการแพร่กระจายของน้ำเค็มในสภาวะการใช้น้ำปัจจุบันพบว่า บริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐานจะจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลา ได้แก่ บริเวณบ้านไต้ บ้านหนองหิน บ้านควน และริมทะเลอ่าวไทย ได้แก่ บริเวณวัดคิหลวงนอก ส่วนบริเวณอื่นโดยเฉพาะตัวเมืองหาดใหญ่พบว่าปริมาณคลอไรด์ อยู่ในเกณฑ์ดี ดังแสดงในรูปที่ 6

4.3 การประเมินศักยภาพของน้ำบาดาล

การประเมินศักยภาพของน้ำบาดาลในรูปของปริมาณการสูบน้ำที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดการรุกคืบของน้ำเค็ม (Safe yield) โดยใช้แบบจำลองที่ทำการปรับเทียบเรียบร้อยแล้วจำลองการสูบน้ำ



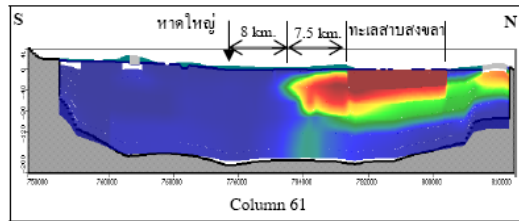
รูปที่ 5 ผลการจำลองการไหลในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา



รูปที่ 6 ผลการจำลองการรุกคืบของน้ำเค็ม

ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วง 20 ปีข้างหน้า พบว่าที่เวลา 5, 10, 15 และ 20 ปี บริเวณเมืองหาดใหญ่ เกิดระยะน้ำลดสูงสุดประมาณ 3.50, 5.50, 7.0 และ 10 เมตร ตามลำดับ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยน้ำลด (Cone of depression) ประมาณ 2.50-3.75 กิโลเมตร ส่วนบริเวณอื่น เช่น อำเภอบางกล่ำ และริมทะเลสาบสงขลาพบว่าลดลงไม่เกิน 2 เมตร ผลการจำลองการรุกคืบของน้ำเค็มพบว่า พื้นที่ที่มีการรุกคืบของน้ำเค็ม (Seawater intrusion

zone) มีการรุกตัวของน้ำเค็มเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้เมืองหาดใหญ่ และมีการแพร่กระจายในแนวตั้งจากชั้นน้ำบาดใหญ่สู่ชั้นน้ำคู้ต่ำ อย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ภาพตัดขวางแสดงการรุกตัวของน้ำเค็ม

5.สรุป

ผลการจำลองการรุกตัวของน้ำเค็มโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW V.4.1 สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ในสภาวะการใช้น้ำในปัจจุบัน (25 Mm³/yr) พบว่าบริเวณที่ความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่ามาตรฐานจะจำกัดอยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเลสาบสงขลาของชั้นน้ำบาดใหญ่ ได้แก่ บริเวณบ้านได้ บ้านหนองหิน บ้านควน บ้านบางโหนด และริมทะเลอ่าวไทย ส่วนชั้นน้ำคู้ต่ำและคองหส์พบว่าปริมาณคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดี (เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม 250 มก./ล. เกณฑ์อนุโลมสูงสุด 600 มก./ล.) ทั้งนี้เนื่องจากการสูบน้ำน้อยกว่าชั้นน้ำบาดใหญ่

2) กรณีจำลองให้มีการสูบน้ำเพิ่มขึ้นปีละ 5% ในช่วงเวลา 20 ปีข้างหน้า พบว่า มีการรุกตัวของน้ำเค็มเพิ่มขึ้นและมีการแพร่กระจายในแนวตั้งจากชั้นน้ำบาดใหญ่สู่ชั้นน้ำคู้ต่ำ อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำพบว่า บริเวณเมืองหาดใหญ่ระดับน้ำลดลงประมาณ 3.5-10 เมตร จึงควรกำหนดอัตราสูบน้ำสูงสุด (Safe yield) ไม่เกิน 36 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เพื่อรักษาระดับน้ำไม่ให้ลดลงเกิน 5 เมตร

6. บรรณานุกรม

[1] กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2546. โครงการศึกษาศักยภาพน้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา. กรุงเทพฯ: กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.
 [2] Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. Groundwater. Prentice Hall: New York.
 [3] Ghassemi F., T. H. Chen, A. J. Jakeman, and G. Jacobson, 1993. Two and Three-dimensional simulation of seawater intrusion: performances of

the "SUTRA" and "HST3D" models, AGSO J. Australian. Geology. & Geophysics, 14(2/3), 219-226.
 [4] 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.
 [5] Baxter, G.P. and Wallace, C.C., 1916. Changes in volume upon solution in water of halogen salts of alkalimetals: IX, American Chemical Society Journal, no. 38, p. 70-104.
 [6] Zheng, C., 1990. MT3D, A Modular Three-Dimensional Transport Model, S.S. Papadopoulos and Assoc., Rockville, Maryland.
 [7] Waterloo Hydrogeologic Inc., 2005. Visual MODFLOW v.4.1 pro user's manual. Canada.
 [8] Lohawijarn, W., 2005. Potential groundwater resources of Hat Yai Basin in Peninsular Thailand by gravity study. Songklanakarin J. Sci. Technol., 27(3):633-647
 [9] สภา สกฏลแก้ว. 2539. สภาพน้ำบาดาลบริเวณแอ่งหาดใหญ่จังหวัดสงขลา. กรุงเทพฯ : ฝ่ายอุทกธรณีวิทยา กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี.
 [10] กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2549. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจัดทำแนวทางการพัฒนาและอนุรักษ์น้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา. กรุงเทพฯ.
 [11] Spitz, K., and Moreno, F., 1996. A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. New York : John Wiley and Song, Inc.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายอรุณ ลูกจันทร์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4910120063	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้	2547

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ทุนผู้ช่วยวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2549-2550

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อรุณ ลูกจันทร์ ธนิต เกลิมยานนท์และ จีรรัตน์ สกุรัตน์ (2551). คุณสมบัติของชั้นน้ำและคุณภาพน้ำใต้ดินในแอ่งหาคใหญ่ บริเวณทะเลสาบสงขลา. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 8-9 พฤษภาคม 2551. pp. 80-85.