กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

รายงานฉบับสมบูรณ์ เล่มที่ 5/10

โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล

ชุดคู่มือการปฏิบัติงาน
ด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล

คู่มือ ทบ ป 1000-2550 ถึง 3000-2550

จัดทำโดย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ธันวาคม 2551

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 5/10)

โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล

ชุดคู่มือ

การปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล

คู่มือ ทบ ป 1000-2550 ถึง 3000-2550

จัดทำโดย

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ธันวาคม 2551

ข้อมูลบรรณานุกรม

เจ้าของ : กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
ชื่อเรื่อง : รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 5/10)
ชุดคู่มือการปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล
คู่มือ ทบ ป 1000-2550 ถึง 3000-2550
โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล
พิมพ์ครั้งที่ 1 : เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2551 จำนวน 500 เล่ม
โรงพิมพ์ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา 232/199 ม. 6
ถ. ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000
ISBN 978-974-286-585-6

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2539

ชุดคู่มือ
การปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล
คู่มือ ทบ ป 1000-2550 ถึง 3008-2550

เจ้าของโครงการ

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

จัดทำโดย

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กระทรวงศึกษาธิการ

คณะที่ปรึกษาโครงการ

นางสาวสมคิด	บัวเพ็ง	อธิบดีกรมทรัพยากรน้ำบาดาล
นายอนันต์	เกตุเอม	รองอธิบดีกรมทรัพยากรน้ำบาดาล
นายโชติ	ตราชู	รองอธิบดีกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

คณะกรรมการพิจารณาดำเนินการจ้างโดยวิธีตกลง

1. นายปราณีต	ร้อยบาง	ประธานกรรมการ
2. นายบรรจง	พรมจันทร์	กรรมการ
3. นายอำนาจ	เยาวสุต	กรรมการ
4. นายสุทธิพล	เอี่ยมประเสริฐกุล	กรรมการ
5. นางสาวอุไร	บางยี่ขัน	กรรมการ

คณะกรรมการตรวจสอบงาน

1. นายสุพจน์	เจิมสวัสดิ์พงษ์	ประธานกรรมการ
2. ดร.อรนุช	หล่อเพ็ญศรี	กรรมการ
3. นายสุนทร	ปัญจาสุธารส	กรรมการ
4. นายประกอบ	อยู่คง	กรรมการ
5. นางศจีรัตน์	อุ่นประเสริฐสุข	กรรมการ

คณะทำงานตรวจสอบมาตรฐานและคู่มือการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล

1. นายกมลศักดิ์	บัวอ่อน	ประธานคณะทำงาน
2. นางสาววิลาวัณย์	ไทยสงคราม	คณะทำงาน
3. นายประกอบ	อยู่คง	คณะทำงาน
4. นายวสันต์	จันทร์แสง	คณะทำงานและเลขานุการ

คณะทำงานตรวจสอบมาตรฐานและคู่มือการปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล

1. นายสัมฤทธิ์	ชุษณะทัศน์	ประธานคณะทำงาน
2. นายสุนทร	ปัญจาสุธารส	คณะทำงาน
3. นายเทิดศักดิ์	ทรัพย์ทวีวัง	คณะทำงานและเลขานุการ

คณะทำงานตรวจสอบมาตรฐานและคู่มือการปฏิบัติงานด้านการเจาะและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล

1. นายสุพจน์	เจิมสวัสดิ์พงษ์	ประธานคณะทำงาน
2. นายสำเริง	สโมทัย	คณะทำงาน
3. นายพันธ์ศักดิ์	ธีรปัญญาภรณ์	คณะทำงาน
4. นายสุวัฒน์	เปี่ยมปัจจัย	คณะทำงาน
5. นายอุโรม	แก้วจันทร์	คณะทำงานและเลขานุการ

คณะทำงานตรวจสอบมาตรฐานและคู่มือการปฏิบัติงานด้านการอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล

1. นายชัยพร	ศิริพรไพบูลย์	ประธานคณะทำงาน
2. นายอดิสัย	จารุรัตน์	คณะทำงาน
3. ดร.อรัญญา	เฟื่องสวัสดิ์	คณะทำงาน
4. นางโศภิษฐ์	ภิรมย์เลิศ	คณะทำงาน
5. ดร.อรนุช	หล่อเพ็ญศรี	คณะทำงานและเลขานุการ

คณะทำงานตรวจสอบคู่มือการปฏิบัติงานด้านระบบฐานข้อมูลและสารสนเทศน้ำบาดาล

1. นายไพศาล	ลักขณานุรักษ์	ประธานคณะทำงาน
2. นายเทิดศักดิ์	ทรัพย์ทวีวัง	คณะทำงาน
3. นายบุญเลิศ	เลิศพฤกษ์สุกิจ	คณะทำงาน
4. นายธนจักร	ริจิรวนิช	คณะทำงานและเลขานุการ

คณะทำงาน

1.	รศ.ดร.เกรียงศักดิ์	ศรีสุข	หัวหน้าโครงการและผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยา
2.	นายสมชัย	วงศ์สวัสดิ์	รองหัวหน้าโครงการและผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยา
3.	นายเจริญ	เชื่อมไธสง	ผู้เชี่ยวชาญด้านการเจาะและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล
4.	นายวิฑิต	ศิริโภคากิจ	ผู้เชี่ยวชาญด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยา
5.	นายธีรวัชร	อินทรสูต	ผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยา
6.	นายเจตต์	จุลวงษ์	ผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยา
7.	นายธีรศักดิ์	ตั้งสุทธินนท์	ผู้เชี่ยวชาญด้านธรณีวิทยา
8.	รศ.ดร.วิชัย	ศรีบุญลือ	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำ
9.	รศ.ฉลอง	บัวผัน	ผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยา
10.	ผศ.หล้า	อาจวิชัย	ผู้เชี่ยวชาญด้านธรณีวิทยา
11.	ผศ.ดร.ศรัญญา	พรหมโคตร์	ผู้เชี่ยวชาญด้านธรณีเคมี
12.	รศ.ดร.อลิศรา	เรืองแสง	ผู้เชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อม
13.	ดร.พิพัธน์	เรืองแสง	ผู้เชี่ยวชาญด้านระบบฐานข้อมูลและสารสนเทศน้ำบาดาล
14.	นายพรศักดิ์	อรุณกิจกำจร	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมเครื่องกล
15.	ผศ.ดร.อุมา	สีบุญเรือง	ผู้เชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อม
16.	นายโพยม	สราภิรมย์	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมโยธา
17.	นางกฤษณี	คชสาร	ผู้ประสานงานโครงการ
18.	น.ส.ศิริรัตน์	อุปสิทธิ์	นักอุทกธรณีวิทยาและผู้ประสานงานโครงการ
19.	น.ส.ธิดารัตน์	โคตนนท์	นักอุทกธรณีวิทยา
20.	นายสุวันชัย	นาดี	วิศวกรเกษตร
21.	นายสหราช	ทวีพงษ์	นักอุทกธรณีวิทยา
22.	นายประยุทธ	เสนชัย	นักธรณีวิทยา
23.	น.ส.เกวรี	พลเกิ้น	วิศวกรเกษตร
24.	นางนันทนา	ศรีบุญลือ	เจ้าหน้าที่การเงิน
25.	น.ส.ปิยะมาศ	ลีทองดี	เจ้าหน้าที่ธุรการ

คำนำ

น้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการดำรงชีพโดยเฉพาะชุมชนที่แหล่งน้ำอื่นมีไม่เพียงพอกับความต้องการ รวมทั้งเป็นแหล่งน้ำทางเลือกสำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมและการเกษตร ดังนั้นหากกระบวนการปฏิบัติงานด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล เช่น การพัฒนาน้ำบาดาล การสำรวจและประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล และการอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำบาดาลไม่ดำเนินการให้เป็นไปตามมาตรฐานทางวิชาการ อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อทรัพยากรน้ำบาดาลทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพยากที่จะแก้ไขได้ ในอดีตที่ผ่านมาการปฏิบัติงานด้านทรัพยากรน้ำบาดาลยังขาดแนวทางปฏิบัติที่ได้มาตรฐานตามหลักวิชาการ ดังนั้นในปีงบประมาณ 2550 กรมทรัพยากรน้ำบาดาลซึ่งเป็นหน่วยงานหลักที่รับผิดชอบด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลของประเทศได้ว่าจ้างมหาวิทยาลัยขอนแก่น ให้เป็นผู้ดำเนินงานโครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล เพื่อจัดทำมาตรฐานและคู่มือการปฏิบัติงานครอบคลุมการปฏิบัติงานด้านต่าง ๆ ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล 5 ด้าน คือ (1) มาตรฐานและหรือคู่มือการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล (2) มาตรฐานและหรือคู่มือการปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล (3) มาตรฐานและหรือคู่มือการปฏิบัติงานด้านการเจาะและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (4) มาตรฐานและหรือคู่มือการปฏิบัติงานด้านการอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล และ (5) คู่มือการปฏิบัติงานด้านระบบฐานข้อมูลและสารสนเทศน้ำบาดาล โดยกระบวนการยกร่างโดยผู้เชี่ยวชาญด้านต่าง ๆ และการนำร่างมาตรฐานและคู่มือเข้าสู่กระบวนการระดมสมองเพื่อรับฟังความคิดเห็นต่อร่างมาตรฐานและคู่มือต่าง ๆ ก่อนปรับปรุงแก้ไขเป็นรายงานฉบับสมบูรณ์ ซึ่งประกอบด้วยรายงานทั้งหมด 10 เล่ม ได้แก่ รายงานสำหรับผู้บริหาร จำนวน 1 เล่ม ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงาน 4 เล่ม (รวม 25 มาตรฐาน) และชุดคู่มือการปฏิบัติงาน 5 เล่ม (รวม 34 เรื่อง) การตีพิมพ์ชุดมาตรฐานและคู่มือการปฏิบัติงานครั้งนี้เป็นการจัดทำขึ้นเป็นครั้งแรก หากผู้ใช้พบว่ามีเนื้อหาส่วนใดยังไม่ครบสมบูรณ์ มีข้อผิดพลาดที่ควรแก้ไขหรือประสงค์จะเสนอแนะความคิดเห็นประการใด โปรดแจ้งให้กรมทรัพยากรน้ำบาดาลทราบ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการพิจารณาแก้ไขปรับปรุงต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ขอขอบคุณคณะผู้เชี่ยวชาญจากมหาวิทยาลัยขอนแก่น และผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทุกภาคส่วน ซึ่งประกอบด้วย เจ้าหน้าที่กรมทรัพยากรน้ำบาดาลจากฝ่ายต่างๆ ตัวแทนองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น สมาชิกสมาคมน้ำบาดาลไทย การประปาส่วนภูมิภาค การประปานครหลวง กรมทรัพยากรน้ำ สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัด สมาชิกชมรมช่างเจาะน้ำบาดาลแห่งประเทศไทย ตัวแทนบริษัทที่ปรึกษาด้านน้ำบาดาล ตัวแทนผู้ใช้น้ำบาดาลภาคเอกชน และนักวิชาการจากสถาบันการศึกษาต่างๆ ที่มีส่วนร่วมในกระบวนการจัดทำมาตรฐานและคู่มือการปฏิบัติงาน ซึ่งจัดทำขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2550 นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้ให้ความอนุเคราะห์ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และอำนวยความสะดวกต่อการดำเนินงานในขั้นตอนต่างๆ จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล

เล่มที่ 1/10 รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร

เล่มที่ 2/10 ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล (มาตรฐาน ทบ ส 1000-2550 ถึง 4000-2550)

(1) มาตรฐาน ทบ ส 1000-2550 การสำรวจอุทกธรณีวิทยาบนผิวดิน

(2) มาตรฐาน ทบ ส 2001-2550 การคัดเลือกวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน

(3) มาตรฐาน ทบ ส 2002-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินด้วยวิธีการตรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

(4) มาตรฐาน ทบ ส 2003-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินด้วยวิธีการตรวจวัดความเร็วของคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห

(5) มาตรฐาน ทบ ส 2004-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินด้วยวิธีการตรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

(6) มาตรฐาน ทบ ส 2005-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินด้วยวิธีการตรวจวัดแรงโน้มถ่วงจุลภาค

(7) มาตรฐาน ทบ ส 3000-2550 การสำรวจอุทกธรณีวิทยาใต้ผิวดิน

(8) มาตรฐาน ทบ ส 4000-2550 การจัดทำแผนที่อุทกธรณีวิทยา

เล่มที่ 3/10 ชุดคู่มือการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล (คู่มือ ทบ ส 1000-2550 ถึง 4000-2550)

(1) คู่มือ ทบ ส 1000-2550 การสำรวจอุทกธรณีวิทยาบนผิวดิน

(2) คู่มือ ทบ ส 2001-2550 การคัดเลือกวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน

(3) คู่มือ ทบ ส 2002-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินด้วยวิธีการตรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

(4) คู่มือ ทบ ส 2003-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินด้วยวิธีการตรวจวัดความเร็วของคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห

(5) คู่มือ ทบ ส 2004-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินด้วยวิธีการตรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

(6) คู่มือ ทบ ส 2005-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินด้วยวิธีการตรวจวัดแรงโน้มถ่วงจุลภาค

(7) คู่มือ ทบ ส 3000-2550 การสำรวจอุทกธรณีวิทยาใต้ผิวดิน

(8) คู่มือ ทบ ส 4000-2550 การจัดทำแผนที่อุทกธรณีวิทยา

เล่มที่ 4/10 ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล (มาตรฐาน ทบ ป 3001-2550 ถึง 3008-2550)

(1) มาตรฐาน ทบ ป 3001-2550 การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์

(2) มาตรฐาน ทบ ป 3002-2550 การเลือกใช้แบบจำลองน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์

(3) มาตรฐาน ทบ ป 3003-2550 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล

(4) มาตรฐาน ทบ ป 3004-2550 การจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการเคลื่อนที่ของมวลสาร

(5) มาตรฐาน ทบ ป 3005-2550 การประยุกต์ใช้แบบจำลองการไหลของน้ำบาดาลตามสภาพปัญหาของพื้นที่

(6) มาตรฐาน ทบ ป 3006-2550 การปรับเทียบผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล

(7) มาตรฐาน ทบ ป 3007-2550 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล

(8) มาตรฐาน ทบ ป 3008-2550 การจัดทำรายงานผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล

<u>เล่มที่ 5/10 ชุดคู่มือการปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล (คู่มือ ทบ ป 1000-2550 ถึง 3000-2550)</u>

(1) คู่มือ ทบ ป 1000-2550 การประเมินแหล่งน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาล

(2) คู่มือ ทบ ป 2000-2550 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลของแอ่งน้ำบาดาลและการจัดทำแผนการใช้น้ำบาดาล

(3) คู่มือ ทบ ป 3000-2550 การจัดทำแบบจำลองน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์และการประยุกต์ใช้

เล่มที่ 6/10 ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการเจาะและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (มาตรฐาน ทบ พ 1000-2550 ถึง 7000-2550)

(1) มาตรฐาน ทบ พ 1000-2550 การเจาะเพื่อสำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล

โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล

เล่มที่ 6/10 ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการเจาะและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (มาตรฐาน ทบ พ 1000-2550 ถึง 7000-2550) (ต่อ)

(2) มาตรฐาน ทบ พ 2000-2550 การใช้และการแปลค่าข้อมูลหยั่งธรณีวิทยาหลุมเจาะ
(3) มาตรฐาน ทบ พ 3000-2550 การออกแบบและก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล
(4) มาตรฐาน ทบ พ 4000-2550 การพัฒนาบ่อน้ำบาดาล
(5) มาตรฐาน ทบ พ 5000-2550 การสูบทดสอบปริมาณน้ำบาดาล
(6) มาตรฐาน ทบ พ 6000-2550 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนและหินจากหลุมเจาะ
(7) มาตรฐาน ทบ พ 7000-2550 การเก็บตัวอย่างน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาล

เล่มที่ 7/10 ชุดคู่มือการปฏิบัติงานด้านการเจาะและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (คู่มือ ทบ พ 1000-2550 ถึง 12000-2550)

(1) คู่มือ ทบ พ 1000-2550 การเจาะเพื่อสำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล
(2) คู่มือ ทบ พ 2000-2550 การใช้และการแปลค่าข้อมูลหยั่งธรณีวิทยาหลุมเจาะ
(3) คู่มือ ทบ พ 3000-2550 การออกแบบและก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล
(4) คู่มือ ทบ พ 4000-2550 การพัฒนาบ่อน้ำบาดาล
(5) คู่มือ ทบ พ 5000-2550 การสูบทดสอบปริมาณน้ำบาดาล
(6) คู่มือ ทบ พ 6000-2550 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนและหินจากหลุมเจาะ
(7) คู่มือ ทบ พ 7000-2550 การเก็บตัวอย่างน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาล
(8) คู่มือ ทบ พ 8000-2550 การคัดเลือกและติดตั้งเครื่องสูบน้ำ
(9) คู่มือ ทบ พ 9000-2550 การบำรุงรักษาบ่อน้ำบาดาล
(10) คู่มือ ทบ พ 10000-2550 การออกแบบก่อสร้างและบริหารจัดการระบบประปาบาดาล
(11) คู่มือ ทบ พ 11000-2550 การพิจารณาตัดสินใจสำหรับผู้ว่าจ้างเจาะบ่อน้ำบาดาล
(12) คู่มือ ทบ พ 12000-2550 การประเมินราคากลางการเจาะและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล

เล่มที่ 8/10 ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล (มาตรฐาน ทบ อ 1000-2550 และ 6000-2550)

(1) มาตรฐาน ทบ อ 1000-2550 การวางเครือข่ายบ่อสังเกตการณ์ การติดตามระดับ และคุณภาพน้ำบาดาล
(2) มาตรฐาน ทบ อ 6000-2550 การอุดกลบบ่อน้ำบาดาล

เล่มที่ 9/10 ชุดคู่มือการปฏิบัติงานด้านการอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล (คู่มือ ทบ อ 1000-2550 ถึง 7000-2550)

(1) คู่มือ ทบ อ 1000-2550 การวางเครือข่ายบ่อสังเกตการณ์ การติดตามระดับและคุณภาพน้ำบาดาล
(2) คู่มือ ทบ อ 2000-2550 การประเมินความเสี่ยงการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล
(3) คู่มือ ทบ อ 3000-2550 การประเมินผลกระทบจากการใช้น้ำบาดาลเกินสมดุล
(4) คู่มือ ทบ อ 4001-2550 การเติมน้ำลงแหล่งน้ำบาดาล
(5) คู่มือ ทบ อ 4002-2550 การสร้างระบบกักเก็บน้ำใต้ดินด้วยเขื่อนใต้ดิน
(6) คู่มือ ทบ อ 4003-2550 การควบคุมการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน
(7) คู่มือ ทบ อ 4004-2550 การฟื้นฟูเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยวิธีการทางเคมีและชีวภาพ
(8) คู่มือ ทบ อ 5000-2550 การอนุรักษ์แหล่งน้ำบาดาล
(9) คู่มือ ทบ อ 6000-2550 การอุดกลบบ่อน้ำบาดาล
(10) คู่มือ ทบ อ 7000-2550 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลเพื่อการอนุรักษ์แหล่งน้ำบาดาล

เล่มที่ 10/10 ชุดคู่มือการปฏิบัติงานด้านระบบฐานข้อมูลและสารสนเทศน้ำบาดาล (คู่มือ ทบ ฐ 1000-2550)

(1) คู่มือ ทบ ฐ 1000-2550 การปฏิบัติงานด้านระบบฐานข้อมูลและสารสนเทศน้ำบาดาล

สารบัญ

หน้า

คู่มือ ทบ ป 1000-2550 การประเมินแหล่งน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาล 1

1. บทนำ 1
2. ขอบเขต 1
3. เอกสารที่เกี่ยวข้อง 2
4. ศัพท์บัญญัติ 2
5. ความสำคัญและการใช้งาน 3
6. พื้นฐานอุทกธรณีวิทยา 3
7. การจำแนกแหล่งน้ำบาดาล 11
   - 7.1 แนวทางการจำแนกแหล่งน้ำบาดาล 11
   - 7.2 ประวัติการจำแนกแหล่งน้ำบาดาลในประเทศไทย 11
   - 7.3 ระบบการกำหนดชื่อและหมายเลขแอ่ง น้ำบาดาล 12
   - 7.4 การจำแนกแอ่งน้ำบาดาลตามเขตอุทกวิทยาของประเทศไทย 12

8 แนวคิดการหาปริมาณน้ำต้นทุน 16

9 ขั้นตอนการประเมินน้ำต้นทุนของแอ่ง น้ำบาดาล 18

10. เอกสารอ้างอิง 24

คู่มือ ทบ ป 2000-2550 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลของแอ่งน้ำบาดาลและการจัดทำแผนการใช้น้ำบาดาล 26

1. บทนำ 26
2. ขอบเขต 27
3. เอกสารที่เกี่ยวข้อง 27
4. ศัพท์บัญญัติ 28
5. ความสำคัญและการใช้งาน 28
6. การประมาณปริมาณน้ำไหลเติมสู่ชั้นน้ำบาดาล 28
   - 6.1 การประมาณปริมาณน้ำไหลเติมสู่แอ่งน้ำบาดาลในช่วงฤดูฝน 28
   - 6.2 การประมาณปริมาณน้ำบาดาลในฤดูแล้ง 29
   - 6.3 การประมาณการสูญเสียน้ำบาดาลและการกำหนดปริมาณการสูบน้ำบาดาล 30
7. หลักปฏิบัติการบริหารจัดการทรัพยากร น้ำบาดาล 31
   - 7.1 องค์ประกอบของการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล 31
   - 7.2 การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล ในแอ่ง 33
   - 7.3 การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่แหล่งน้ำบาดาล 34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

8 แนวทางการจัดทำแผนการจัดสรรทรัพยากรน้ำบาดาล 35
8.1 องค์ประกอบของการจัดแผนการใช้ทรัพยากรน้ำบาดาล 35
8.2 แผนการลดปริมาณการใช้น้ำบาดาล 36
9. เอกสารอ้างอิง 37

คู่มือ ทบ ป 3000-2550 การจัดทำแบบจำลองน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์และการประยุกต์ใช้ 38

1. บทนำ 38
2. ความสำคัญและการใช้งาน 38
3. ทฤษฎีการไหลของน้ำบาดาลและการเคลื่อนที่ของมวลสาร 39
3.1 กระบวนการหลักที่เกิดขึ้นกับการไหลของน้ำบาดาล 39
3.2 สมการการไหลของน้ำบาดาล 42
3.3 สมการการเคลื่อนที่ของมวลสาร 42
4. ประเภทของแบบจำลอง 43
4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงวิเคราะห์ 43
4.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ประเภทเชิงตัวเลข 44
4.3 การแก้ชุดสมการเส้นตรง 45
5. ขั้นตอนการจำลองน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์ 45
5.1 กำหนดวัตถุประสงค์ของแบบจำลอง 45
5.2 การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ 45
5.3 การคัดเลือกซอฟต์แวร์แบบจำลอง 48
5.4 ขนาดของกริด 49
5.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลสนาม การปรับค่าตัวแปร และการวิเคราะห์ความอ่อนไหว 50
5.6 การตรวจทานวิธีการคำนวณของโปรแกรม 52
5.7 การคาดคะเนผลและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว 52
5.8 การแสดงผลการจำลอง 55
5.9 การตรวจสอบผลการจำลอง 55
6. การเฝ้าติดตามผล 55
7. การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ 56
7.1 แบบจำลองการจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล 56
7.2 แบบจำลองค่าเหมาะสมที่สุด 59
8. เอกสารอ้างอิง 61

คู่มือ ทบ ป 1000-2550
การประเมินแหล่งน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาล

คู่มือ ทบ ป 1000-2550 เป็นคู่มือการปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล (ป) ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (ทบ) กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ตัวเลขชุดแรกมี 4 ตำแหน่ง หมายถึง ลำดับของคู่มือ ตัวเลขชุดที่สอง "2550" หมายถึง ปี พ.ศ. ที่จัดทำเอกสารต้นฉบับของคู่มือ กรณีที่มีการแก้ไขและปรับปรุงคู่มือให้ใส่วงเล็บต่อท้ายและระบุ ปี พ.ศ. ที่แก้ไขปรับปรุง เช่น (แก้ไขปรับปรุง 2555) เป็นต้น โดยมีเครื่องหมาย $^{(n)}$ เป็นตัวยกกำกับหน้าข้อความที่แก้ไข และมีเครื่องหมาย $^{(ป)}$ เป็นตัวยกกำกับหน้าข้อความที่ปรับปรุงขึ้นใหม่

1. บทนำ

ในการบริหารจัดการน้ำ จำเป็นจะต้องรู้ศักยภาพแหล่งน้ำ และการที่จะรู้ศักยภาพแหล่งน้ำได้จะต้องรู้ปริมาณน้ำต้นทุนก่อนทั้งกรณีแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำบาดาล ดังนั้นความสามารถในการประเมินปริมาณน้ำต้นทุนของแหล่งน้ำจึงมีความสำคัญเป็นอันดับแรก

การประเมินปริมาณน้ำต้นทุนของแหล่งน้ำบาดาลในแต่ละพื้นที่ หมายถึง การคำนวณปริมาณน้ำในชั้นน้ำของพื้นที่นั้นๆ ซึ่งจะต้องประกอบด้วยการประเมินขอบเขตและความหนาของชั้นน้ำความ สามารถในการกักเก็บน้ำ และความสามารถในการส่งผ่านน้ำ ชั้นน้ำเป็นธรรมชาติที่มีความสลับซับซ้อนมาก ทั้งในกรณีของชั้นน้ำหินร่วน (ชั้นกรวดทราย) และชั้นน้ำหินแข็ง (หินที่มีรอยแตกรอยแยก และโพรง) เนื่องจากชั้นน้ำอยู่ใต้ผิวดินไม่สามารถตรวจสอบได้ง่ายๆ ดังนั้นการกำหนดขอบเขตและขนาดของชั้นน้ำจึงต้องใช้ข้อมูลและวิจารณญาณที่ถูกต้อง ข้อมูลที่สำคัญได้แก่ แผนที่ทั้งหลาย เช่นแผนที่ภูมิประเทศ แผนที่ธรณีวิทยา แผนที่อุทกธรณีวิทยา แผนที่ดินและการใช้ที่ดิน เป็นต้น ภาพถ่ายทางอากาศ และภาพถ่ายดาวเทียม ข้อมูลหลุมเจาะ และข้อมูลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ จากข้อมูลเหล่านี้จะช่วยในการจำแนกแหล่งน้ำบาดาล ซึ่งมีหลักการดังจะได้กล่าวต่อไป

2. ขอบเขต

2.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของคู่มือนี้เพื่ออธิบายวิธีการประเมินปริมาณน้ำต้นทุนในชั้นน้ำบาดาลให้ถูกต้อง ทั้งในกรณีชั้นน้ำเปิดและชั้นน้ำปิด เมื่อรวมปริมาณน้ำต้นทุนทุกๆชั้นน้ำบาดาลจะได้เป็นน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาล

2.2 ความละเอียดถูกต้องของการประเมินปริมาณน้ำต้นทุน

ความละเอียดถูกต้องของการประเมินปริมาณน้ำต้นทุนขึ้นอยู่กับความละเอียดถูกต้องของข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่สำคัญมีดังนี้ ขอบเขตพื้นที่ของแอ่งน้ำบาดาล ความหนาของชั้นน้ำ เส้นชั้นระดับของระดับน้ำใต้ดิน (contour of water table) เส้นชั้นระดับของพื้นขอบล่างของชั้นน้ำเปิด (contour of impervious floor of uncon-fined aquifer) เส้นชั้นระดับของระดับน้ำบาดาล (contour of potentiometric surface) เส้นชั้นระดับของพื้นผิวขอบบนของชั้นน้ำปิด (contour of top boundary of confined aquifer) ความพรุนของเนื้อหินอุ้มน้ำ (porosity of aquifer) อัตราการให้น้ำจำเพาะของชั้นน้ำ (specific yield of uncon-fined aquifer) สัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นน้ำปิด (storativity of confined aquifer) การเก็บกักจำเพาะ (specific storage)

3. เอกสารที่เกี่ยวข้อง

3.1 กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

- คู่มือ ทบ ส 1000-2550 การสำรวจอุทกธรณีวิทยาบนผิวดิน
- คู่มือ ทบ ส 2001-2550 การคัดเลือกวิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน
- คู่มือ ทบ ส 2002-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินด้วยวิธีการตรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ
- คู่มือ ทบ ส 2003-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน ด้วยวิธีการตรวจวัดความเร็วของคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห
- คู่มือ ทบ ส 2004-2550 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินด้วยวิธีการตรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- คู่มือ ทบ ส 3000-2550 การสำรวจอุทกธรณีวิทยาใต้ผิวดิน
- คู่มือ ทบ ส 4000-2550 การจัดทำแผนที่อุทกธรณีวิทยา
- คู่มือ ทบ พ 1000-2550 การเจาะเพื่อการสำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล
- คู่มือ ทบ พ 2000-2550 การใช้และการแปลค่าข้อมูลหยั่งธรณีหลุมเจาะ
- คู่มือ ทบ พ 6000-2550 การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่างดินและหินจากหลุมเจาะ
- คู่มือ ทบ พ 7000-2550 การเก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาล
- คู่มือ ทบ พ 5000-2550 การสูบทดสอบปริมาณน้ำ

4. ศัพท์บัญญัติ

4.1 การเก็บกักจำเพาะ (specific storage) หมายถึง ค่าพารามิเตอร์แสดงปริมาตรน้ำบาดาลที่ได้จากหรือเข้าสู่ชั้นหินใต้น้ำหนึ่งหน่วยพื้นที่ในแนวระนาบ และหนึ่งหน่วยความหนาของชั้นหินให้น้ำ ทำให้เฮดของน้ำบาดาลเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย

4.2 การสูบทดสอบ (pumping test) หมายถึง การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชั้นน้ำโดยการสูบน้ำออกจากบ่อสูบและวัดอัตราการลดลงของระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์และหรือบ่อสูบ แล้ววิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

4.3 พื้นที่รับน้ำบาดาล (recharge area, recharge zone) หมายถึง พื้นที่ที่น้ำผิวดินสามารถไหลลึกลงสู่ใต้ผิวดินและไหลลงไปสู่ชั้นหินอุ้มน้ำ หรือเป็นพื้นที่ที่น้ำจากชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้นสามารถไหลลงไปเติมน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำระดับลึกกว่า

4.4 พื้นที่สูญเสียน้ำบาดาล (discharge area, discharge zone) หมายถึง พื้นที่ซึ่งน้ำบาดาลไหลออกสู่ผิวดิน แหล่งน้ำผิวดิน และบรรยากาศ

4.5 สัมประสิทธิ์การกักเก็บ (storativity, storage coefficient) หมายถึง ปริมาตรน้ำบาดาลที่ได้จากชั้นให้น้ำต่อหน่วยพื้นที่ในแนวระนาบต่อหน่วยเฮดที่ลดลง

4.6 ความต่อเนื่องทางชลศาสตร์ (hydraulic conductivity, permeability) หมายถึง ระดับความสัมพันธ์ด้านชลศาสตร์ระหว่างชั้นหินอุ้มน้ำสองชั้นหรือระหว่างชั้นหินอุ้มน้ำกับแหล่งน้ำผิวดิน เช่นระดับความเร็วของน้ำผิวดินไหลเติมลงไปในชั้นหินอุ้มน้ำ เป็นต้น

4.7 สภาพส่งผ่าน (transmissivity) หมายถึง พารามิเตอร์ที่เกี่ยวเนื่องกับความยากง่ายของการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านชั้นหินให้น้ำในแนวระนาบ

4.8 แหล่งน้ำบาดาล (groundwater resource) หมายถึง บริเวณที่มีชั้นน้ำที่มีปริมาณน้ำมากและอัตราการให้น้ำสูง

4.9 อัตราการให้น้ำจำเพาะ (specific yield) หมายถึง เป็นอัตราส่วนของน้ำบาดาลที่สามารถสูบขึ้นมาได้ต่อปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยความกว้าง ความยาวและความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำ (ไม่มีหน่วย)

4.10 แอ่งน้ำบาดาล (groundwater basin) หมายถึง แอ่งตะกอนที่มีชั้นหินตะกอนอุ้มน้ำหรือกลุ่มของหินอุ้มน้ำ มีอาณาเขตหรือขอบเขตที่แน่นอน ซึ่งเกิดจากการปิดกั้นโดยลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ เช่น ชั้นหินกั้นน้ำ (no-flow boundaries) โครงสร้างทางธรณีวิทยา (fault boundaries) หรือทางอุทกวิทยา (open boundaries)

4.11 เฮด (head) หมายถึง ค่าระดับพลังงานของของเหลว ณ จุดหนึ่ง ในหน่วยของความยาว ซึ่งหาได้จากความสูงของจุดที่พิจารณาจากระดับอ้างอิงบวกด้วยแรงดันของน้ำที่อยู่เหนือจุดที่พิจารณา

5. ความสำคัญและการใช้งาน

ปริมาณน้ำต้นทุนหมายถึงปริมาณน้ำในแอ่งน้ำบาดาลในขณะปัจจุบันหรือในขณะเริ่มต้น การประเมินปริมาณน้ำต้นทุนมีความสำคัญต่อการวางแผนการจัดการน้ำทั้งระบบ โดยพิจารณาจากศักยภาพของแอ่งน้ำบาดาลและศักยภาพของแหล่งน้ำผิวดิน รวมทั้งปริมาณความต้องการน้ำ

ปริมาณน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาลช่วยในการประเมินศักยภาพน้ำบาดาลโดยใช้หลักสมดุลน้ำ เมื่อกำหนดช่วงเวลาให้คงที่ ที่ Δt จะได้สมการสมดุลน้ำดังนี้

$$V_{in} - V_{out} - V_{ab} = S_{t+\Delta t} - S_t \qquad (1)$$

เมื่อ V_{in} คือปริมาตรน้ำที่เพิ่มเติมเข้าสู่แอ่งน้ำบาดาล, V_{out} คือ ปริมาตรน้ำที่ออกจากแอ่งน้ำบาดาลตามธรรมชาติ, V_{ab} คือ ศักยภาพของแอ่งน้ำบาดาล,

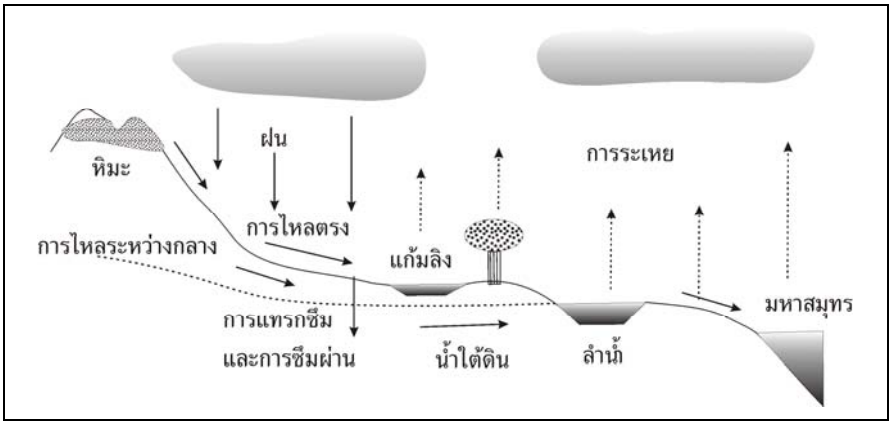
$S_{t+\Delta t}$ คือ ปริมาณน้ำที่เวลา Δt นับจากปัจจุบันหรือจากเวลาที่เริ่มต้น โดยถือเอาเกณฑ์จากปริมาณปลอดภัย คือ ต้องไม่เกิดผลเสียต่อระบบน้ำบาดาล ต่อสิ่งแวดล้อม ต่อระบบเศรษฐกิจและสังคม และสุดท้าย S_t คือ ปริมาณน้ำต้นทุน

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า ค่าของปริมาณน้ำต้นทุน (S_t) มีความสำคัญต่อการประเมินศักยภาพน้ำบาดาล (V_{ab}) ไม่น้อยไปกว่าค่าของปริมาณเพิ่มเติมน้ำเข้าสู่แอ่งน้ำบาดาล (V_{in}) และปริมาณไหลออกจากแอ่งน้ำบาดาล (V_{out}) รวมทั้งเกณฑ์กำหนดต่าง ๆที่จะเกิดผลกระทบต่อระบบน้ำบาดาลและสิ่งแวดล้อม ซึ่งแสดงอยู่ในปริมาณน้ำที่เวลาถัดไป ($S_{t+\Delta t}$)

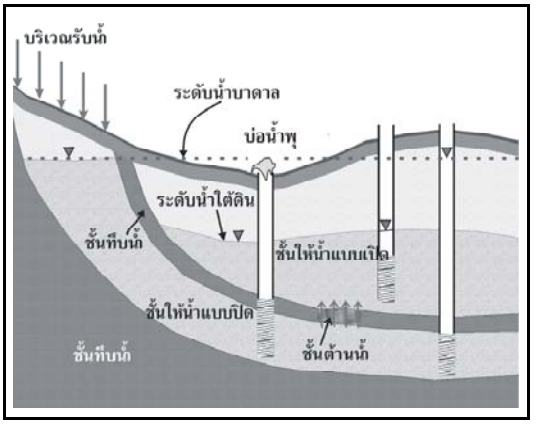
6. พื้นฐานอุทกธรณีวิทยา

วิชาที่ว่าด้วยน้ำบาดาลเรียกว่าอุทกธรณีวิทยา เป็นวิชาที่ครอบคลุมถึงการเกิด การเก็บกัก การเคลื่อนที่ และคุณภาพน้ำบาดาล น้ำบาดาลเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรน้ำ (hydrologic cycle) ซึ่งวัฏจักรน้ำกล่าวถึงการหมุนเวียน เคลื่อนที่ และเปลี่ยนสถานะของน้ำในโลก (รูปที่ 1) วัฏจักรน้ำไม่มีต้นมีปลาย อาจเริ่มพิจารณาจากน้ำในมหาสมุทร ซึ่งเมื่อระเหยกลายเป็นไอน้ำ บางส่วนของไอน้ำถูกลมพัดพาไปยังผืนแผ่นดิน แล้วควบแน่นเป็นละอองน้ำรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเมฆ เมื่อละอองน้ำมีสภาวะที่เหมาะสม ก็จะกลายเป็นฝนตกลงทั้งในทะเลมหาสมุทร และบนผืนแผ่นดิน ฝนที่ตกลงบนพื้นดินบางส่วนระเหยกลับสู่บรรยากาศ บางส่วนไหลไปบนผิวดิน บางส่วนซึมลงใต้ผิวดิน น้ำใต้ผิวดินระดับตื้นถูกพืชดูดไปใช้และคายออกทางปากใบ แต่ส่วนที่ซึมลึกลงสู่ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ เรียกว่าน้ำบาดาล

น้ำบาดาลแทรกตัวอยู่ตามโพรงช่องว่าง ในชั้นหินจนถึงระดับอิ่มตัวด้วยน้ำ ถ้าเป็นชั้นหินที่เก็บกักน้ำได้มากและสามารถส่งผ่านน้ำได้ดี เราเรียกชั้นหินนี้ว่าชั้นน้ำ (aquifer) แต่ถ้าเป็นชั้นหินที่ส่งผ่านน้ำได้ไม่ดี เรียกว่า ชั้นหินต้านน้ำ (aquitard) ตามลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา ชั้นน้ำและชั้นหินต้านน้ำมักจะมีตำแหน่งที่วางสลับกัน ดังนั้นชั้นหินต้านน้ำจึงกั้นน้ำไว้ในชั้นน้ำ เราจึงเรียกชั้นหินต้านน้ำว่า ชั้นกั้นน้ำ (confining layer) (รูปที่ 2)



รูปที่ 1 วัฏจักรน้ำ (ดัดแปลงจาก Mansell, 2003)



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางอุทกธรณีวิทยา
(ดัดแปลงจาก Todd, 1980)

ลักษณะของวัสดุหรือเนื้อของชั้นน้ำแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชั้นน้ำหินร่วน (unconsolidated aquifer) และชั้นน้ำหินแข็ง (fracture rock aquifer) ชั้นน้ำหินร่วนได้แก่ ชั้นตะกอนกรวดทราย (clean alluvium) ที่ยังไม่มีสารเชื่อมให้ก้อนกรวดทรายจับตัวกันเป็นก้อนทึบน้ำบาดาลแทรกตัวอยู่ตามช่องระหว่างเม็ดกรวดทราย ชั้นน้ำหินแข็งได้แก่ ชั้นหินที่มีรอยแตก รอยแยก และรอยเลื่อน ในพวกหินทุกชนิด ได้แก่ หินชั้น (sedimentary rock) หินอัคนี (igneous rock) และหินแปร (metamorphic rock) ในหินอัคนีและหินแปรมีรอยแตก รอยแยกและรอยเลื่อนน้อย โดยเฉพาะหินแปรดังนั้นหินแปรจึงเป็นชั้นน้ำที่ไม่ดี เก็บกักน้ำและส่งผ่านน้ำได้เล็กน้อย หินอัคนีบางชนิด เช่น หินบะซอลท์ มีรอยแตก รอยแยกในชั้นหินมาก ดังนั้นหินอัคนีจึงเป็นชั้นน้ำที่ดีกว่าหินแปร ส่วนหินตะกอนมักจะมีรอยแตก รอยแยกและรอยเลื่อนมาก และยังมีช่องว่างระหว่างเม็ดหินอีกด้วย ดังนั้นหินตะกอนจึงเป็นชั้นน้ำที่ดี หินปูนเป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งซึ่งแม้ว่าเนื้อหินจะทึบน้ำแต่มีรอยแตกและโพรง ซึ่งเกิดจากการละลายเนื่องจากน้ำฝนที่เป็นกรดอ่อนๆ ลักษณะของโพรงช่องว่างในทั้งชั้นหินร่วน หินแข็ง และหินปูนแสดงในรูปที่ 3

ลักษณะของชั้นน้ำในเชิงอุทกธรณีวิทยาแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ชั้นน้ำเปิดหรือชั้นน้ำไร้แรงดัน (unconfined aquifer) และชั้นน้ำปิดหรือชั้นน้ำมีแรงดัน (confined aquifer) ซึ่งแตกต่างกันตรงที่ขอบบนของชั้นน้ำเปิดเป็นระดับน้ำใต้ดิน (water table) ส่วนขอบบนของชั้นน้ำปิดเป็นชั้นกั้นน้ำ (รูปที่ 2) ดังนั้นชั้นน้ำเปิดจึงมักจะเป็นชั้นน้ำแรกที่อยู่ใต้ผิวดิน ผิวบนของชั้นน้ำเปิดสัมผัสกับชั้นบรรยากาศ (แม้อยู่ใต้ผิวดิน) ความดันน้ำบาดาลที่ผิวบนของชั้นน้ำเปิดมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ บ่อที่ได้น้ำจากชั้นน้ำเปิดจะได้ระดับน้ำในบ่อเท่ากับขอบบนของชั้นน้ำ และขอบบนของชั้นน้ำเปิดย่อมแปรผันไปตามฤดูกาลใน

ฤดูฝนขอบบนของชั้นน้ำเปิดจะเคลื่อนที่สูงขึ้น ส่วนฤดูแล้งจะเคลื่อนที่ต่ำลง

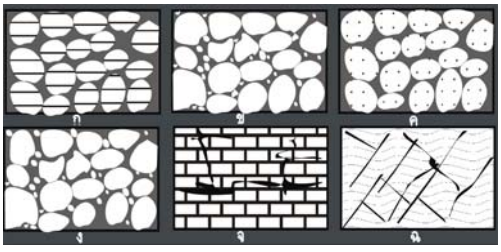
ชั้นหินกั้นน้ำปิด ที่ขอบบนมีชั้นกั้นน้ำปิดเอาไว้ ดังนั้นความดันน้ำบาดาลที่ขอบบนของชั้นน้ำปิดย่อมมีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศ บ่อที่ได้น้ำจากชั้นน้ำปิดจะมีระดับน้ำในบ่ออยู่สูงกว่าขอบบนของชั้นน้ำปิด ในพื้นที่หนึ่งๆชั้นน้ำเปิดอาจจะมีชั้นเดียวในชั้นบนสุด แต่อาจจะมีชั้นน้ำปิดหลายชั้นก็ได้ เช่น แอ่งน้ำบาดาลเจ้าพระยาตอนล่าง ซึ่งครอบคลุมกรุงเทพฯและพื้นที่โดยรอบ มีชั้นน้ำปิดประมาณ 8 ชั้น ได้แก่ ชั้นน้ำกรุงเทพ ชั้นน้ำปทุมธานี เป็นต้น

การเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในอุทกธรณีวิทยา น้ำบาดาลเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีเฮดสูงไปยังบริเวณที่มีเฮดต่ำกว่า เฮดของน้ำบาดาล (groundwater head) หมายถึง ระดับพลังงานของน้ำบาดาล ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาณพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของน้ำบาดาล พลังงานมีค่าเท่ากับแรงคูณด้วยระยะทาง มีหน่วยเป็น Newton $\times$ meter (Nm) และน้ำหนักคือแรงโน้มถ่วงที่กระทำกับน้ำบาดาล มีหน่วยเป็น Newton (N) ดังนั้นเฮดจึงมีหน่วยเป็นความสูง meter (Nm/N = m)

เฮดของน้ำบาดาลเกิดจากพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และพลังงานที่เกิดจากแรงดันน้ำ เนื่องจากน้ำบาดาลเคลื่อนที่ช้ามาก พลังงานจลน์จึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานศักย์ และพลังงานเนื่องจากแรงดัน ดังนั้นเฮดของน้ำบาดาลจึงประกอบด้วย เฮดความดัน (pressure head) และเฮดระดับ (elevation head) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$h = h_p + h_e \qquad (2)$$

เมื่อ h คือ เฮดของน้ำบาดาล, h_p คือ เฮดความดัน และ h_e คือ เฮดระดับ



(ก) ตะกอนสะสมตัวกันอย่างดีมีความพรุนสูง
(ข) ตะกอนสะสมตัวและเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ มีความพรุนต่ำ
(ค) ตะกอนประกอบด้วยกรวดซึ่งมีความพรุนในตัวเองอยู่แล้ว เรียงตัวกันอย่างมีระเบียบ ชั้นหินประเภทนี้มีความพรุนสูง
(ง) ตะกอนสะสมและเรียงตัวอย่างมีระเบียบแต่ช่องว่างถูกน้ำแร่มาตกตัวอยู่ทำให้ไม่มีความพรุน
(จ) หินซึ่งเกิดความพรุนเนื่องจากส่วนประกอบเดิมถูกน้ำยาเคมีละลายออกไป
(ฉ) หินซึ่งเกิดความพรุนเนื่องจากมีรอยแตกร้าว

รูปที่ 3 ความพรุนของหิน
(ดัดแปลงจาก Meinzer, 1923)

เฮดความดันเกิดจากพลังงานเนื่องจากแรงดันที่กระทำกับน้ำบาดาล ณ จุดที่พิจารณาซึ่งคำนวณได้จาก

$$h_p = p / (\rho g) \qquad (3)$$

เมื่อ p คือ ค่าความดันน้ำบาดาล ณ จุดที่พิจารณา, ρ คือ ความหนาแน่น และ g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

วัดเฮดความดันได้โดยใช้ท่อกลวงปลายเปิดทั้งสองข้าง จ่อปลายล่างเข้าตรงจุดที่ต้องการวัด น้ำจะดันเข้าไปในท่อ ความสูงของน้ำในแนวดิ่งจากจุดวัดคือ ค่าเฮดความดัน เรียกท่อที่ใช้วัดความดันว่า พีโซมิเตอร์ (piezometer) หรือมานอมิเตอร์ (manometer)

เฮดระดับเกิดจากพลังงานศักย์ของน้ำบาดาล เฮดระดับมีค่าเท่ากับระดับความสูงในแนวดิ่งของจุดพิจารณาวัดจากระดับอ้างอิง ถ้าจุดอยู่สูงกว่าระดับ

อ้างอิงค่าเฮดที่ได้ระดับเป็นบวก และค่าเฮดระดับมีค่าเป็นลบถ้าจุดอยู่ใต้ระดับอ้างอิง ซึ่งระดับอ้างอิงจะกำหนดเอาที่ระดับใดก็ได้ตามความเหมาะสม โดยปกติมักจะถือเอาระดับน้ำทะเลปานกลาง เนื่องจากระดับอ้างอิงสามารถกำหนดเอาได้ตามใจชอบ ดังนั้นเฮดระดับจะมีความหมายก็ต่อเมื่อ มีจุดพิจารณาตั้งแต่สองจุดขึ้นไป ซึ่งจะทำให้มีค่าแตกต่างของเฮดเกิดขึ้น

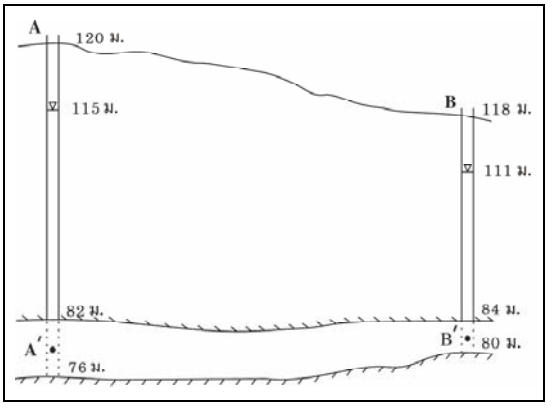
น้ำบาดาลเคลื่อนที่จากจุดที่มีเฮดสูงไปจุดที่มีเฮดต่ำและสามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดๆก็ได้ในสามมิติ แต่เนื่องจากความหนาของชั้นน้ำมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขอบเขตพื้นที่ของชั้นน้ำที่กว้างใหญ่ในแนวระนาบ เช่น ชั้นน้ำในแอ่งเจ้าพระยาตอนล่าง แต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 50 เมตร แต่มีความกว้างและยาวประมาณ 100 ถึง 500 กิโลเมตร เป็นต้น เราจึงพิจารณาการไหลเป็นแบบสองมิติในแนวราบ โดยถือเอาความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางถึงระดับกึ่งกลางระหว่างขอบล่างกับขอบบนของชั้นน้ำเป็นเฮดระดับ และความสูงของระดับผิวน้ำในบ่อวัดจากระดับกึ่งกลางระหว่างขอบล่างกับขอบบนของชั้นน้ำเป็นเฮดความดัน (รูปที่ 4) เมื่อมีบ่อบาดาลอยู่เพียงสองบ่อ จะถือเอาว่าน้ำบาดาลจะเคลื่อนที่จากจุดของบ่อบาดาลที่มีเฮดน้ำบาดาลสูงไปยังจุดที่บ่อบาดาลมีเฮดต่ำกว่า

ตัวอย่างที่ 1 บ่อบาดาล A และ B อยู่ห่างกัน 50 เมตร แต่ละบ่อมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

รายละเอียด	บ่อ A	บ่อ B
ระดับผิวดิน (ม.รทก.)	120	118
ระดับขอบบนของชั้นน้ำ (ม.รทก.)	82	84
ระดับขอบล่างของชั้นน้ำ (ม.รทก.)	76	80
ระดับน้ำลึกจากผิวดิน (ม.)	5	7

จงหาทิศทางการเคลื่อนที่และเกรเดียนต์ของน้ำบาดาล

วิธีทำ



รูปที่ 4 ภาพตัดขวางแสดงชั้นน้ำและบ่อบาดาล

พิจารณาที่จุดกึ่งกลางความหนาของชั้นน้ำ และให้ระดับน้ำทะเลปานกลาง (ร.ท.ก.) เป็นระดับอ้างอิง จะได้เฮดระดับของบ่อ A และ B ดังนี้

$$h_{eA'} = (76 + 82)/2 = 79 \text{ ม.}$$

$$h_{eB'} = (80 + 84)/2 = 82 \text{ ม.}$$

เนื่องจากบ่อบาดาลทำหน้าที่เหมือนพีโซมิเตอร์ ดังนั้นจะได้เฮดความดันของบ่อ A และ B ดังนี้

$$h_{pA'} = (120 - 5) - 79 = 36 \text{ ม.}$$

$$h_{pB'} = (118 - 7) - 82 = 29 \text{ ม.}$$

จะได้เฮดรวมของบ่อ A และ บ่อ B ดังนี้

$$h_{A'} = h_{eA'} + h_{pA'} = 79 + 36 = 115 \text{ ม.}$$

$$h_{B'} = h_{eB'} + h_{pB'} = 82 + 29 = 111 \text{ ม.}$$

เนื่องจากเฮดน้ำบาดาลที่บ่อ A สูงกว่าเฮดน้ำบาดาลที่บ่อ B ดังนั้นน้ำบาดาลจะไหลจากบ่อ A ไปยังบ่อ B

ข้อสังเกตคือเฮดน้ำบาดาลมีค่าเท่ากับระดับความสูงของระดับน้ำบ่อบาดาล (คิดจากระดับอ้างอิงเดียวกัน เช่นจากระดับทะเลปานกลาง)

เกรเดียนต์ (i) หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของเฮดเทียบกับระยะทาง ($\Delta h / \Delta L$) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i = \Delta h / \Delta L$$

สำหรับตัวอย่างนี้ ถ้าคิดจาก A ไปยัง B จะได้

$$\Delta h_{A \rightarrow B} = 111 - 115 = -4 \text{ m}$$

ส่วน ΔL คือระยะห่างระหว่างบ่อทั้งสอง คือ 50 ม. ดังนั้นจะได้ค่าเกรเดียนต์เป็น

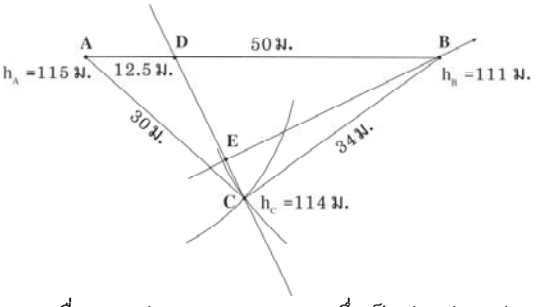
$$i = -4 / 50 = -0.08$$

เมื่อมีบ่อบาดาล 3 บ่อ จะได้ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลในชั้นน้ำอยู่ในแนวเฮดที่ชันที่สุด เรียกว่าแนวเกรเดียนต์ชลศาสตร์ (hydraulic gradient) การหาทิศทางเกรเดียนต์จากทิศทางบ่อบาดาลสามบ่อ เรียกว่า ปัญหาสามจุด (three point problem) ดังแสดงในตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 2 จากตัวอย่างที่ 1 ถ้า C เป็นอีกบ่อหนึ่งที่อยู่ห่างจากบ่อ A 30 ม. และห่างจากบ่อ B 34 ม. ในแนวระนาบ ที่บ่อ C มีระดับผิวดิน 119 ม.รทก. ระดับน้ำบาดาลลึกจากผิวดิน 5 ม. จงหาทิศทางการไหลและเกรเดียนต์ของน้ำบาดาล

วิธีทำ

จากตัวอย่างที่ 1 ได้เฮดที่ A และที่ B เป็น h_A = 115 ม. h_B = 111 ม. ส่วนเฮดที่ C จะได้เป็น h_C = 119-5 = 114 ม. จะได้แปลนของจุด ABC ดังนี้



เนื่องจากค่าของ h_C = 114 ม. ซึ่งเป็นค่าอยู่ระหว่าง h_A (115 ม.) กับ h_B (111 ม.) ดังนั้นบนเส้นตรง AB ย่อมจะได้จุด D ซึ่งมีเฮดเท่ากับ 114 ม. โดยหาระยะ BD ดังนี้

$$\frac{BD}{BA} = \frac{h_D - h_B}{h_A - h_B} = \frac{114 - 111}{115 - 111}$$

$$BD = \frac{3}{4} \times 50 = 37.5 \text{ ม.}$$

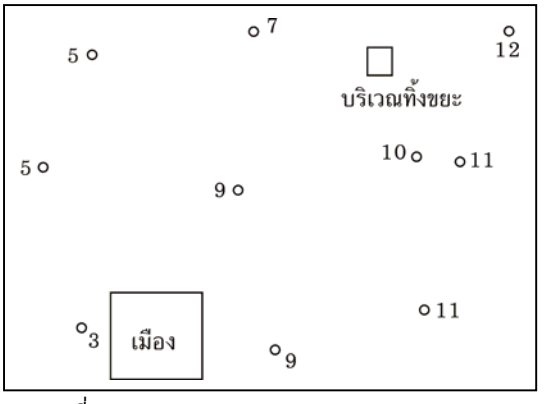
หรือ AD = 50-37.5 = 12.5 ม.

เส้นตรง CD คือ เส้นแสดงเฮดคงที่เท่ากับ 114 ม. ดังนั้นทิศทางการไหลของน้ำบาดาลย่อมตั้งฉากกับ CD และชี้ไปยังทิศทางที่มีเฮดลดลง คือไปทาง B ดังเส้นตรง EB ซึ่งวัดระยะ ได้เท่ากับ 33.5 ม. ดังนั้นจะได้ค่าเกรเดียนต์เป็น

$$i = \frac{111 - 114}{33.5} = -0.09$$

เมื่อมีข้อมูลจากบ่อบาดาลมากขึ้นทำให้ทราบแนวการไหลของน้ำบาดาลได้ละเอียดและถูกต้องมากยิ่งขึ้น เส้นที่แสดงแนวเฮดเท่ากันเรียกว่า เส้นเฮดเท่า (equipotential line) ส่วนเส้นที่ตั้งฉากกับเส้นเฮดเท่าแสดงแนวการไหลเรียกว่า เส้นการไหล (stream line) ตาข่ายที่เกิดจากการตัดกันของเส้นเฮดเท่ากับเส้นการไหลเรียกว่า ตาข่ายการไหล (flow nets) ตาข่ายการไหลเป็นเครื่องมือสำคัญในการออกแบบ คำนวณ และวางแผนบริหารจัดการน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่ 3 จากข้อมูลเฮดและตำแหน่งของบ่อบาดาล 10 บ่อ กระจายอยู่ในบริเวณเมืองและบริเวณพื้นที่เป้าหมายที่จะเป็นที่ทิ้งขยะ (รูปที่ 5) จงพิจารณาว่า ถ้าพื้นที่เป้าหมายจะต้องเป็นที่ทิ้งขยะ น้ำเสียจากบ่อขยะจะไหลมาที่เขตเมืองหรือไม่

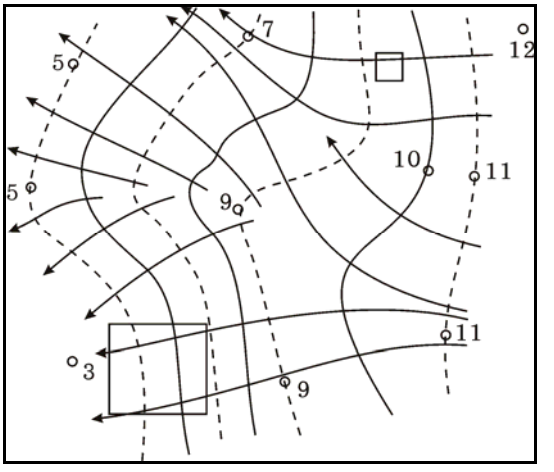


รูปที่ 5 ตำแหน่งบ่อบาดาล ค่าเฮดของแต่ละบ่อ เขตเมืองและบริเวณเป้าหมายที่จะเป็นที่ทิ้งขยะ

วิธีทำ เมื่อพิจารณาอย่างหยาบ ๆจากค่าเฮดของบ่อบาดาลต่าง ๆ พบว่า ที่เขตเมืองมีเฮดต่ำมาก ส่วนบริเวณที่จะเป็นที่ทิ้งขยะมีค่าเฮดสูง ดังนั้นอาจถือเอาในเบื้องต้นว่า น้ำเสียจากหลุมขยะในระบบน้ำบาดาลน่าจะไหลมาที่เขตเมืองได้

เพื่อให้เกิดความชัดเจนจำเป็นต้องสร้างตาข่ายการไหลของระบบน้ำบาดาลของพื้นที่ศึกษา โดยขั้นแรก ทำการลากเส้นเฮดเท่า แล้วจึงลากเส้นการไหลตั้งฉากกับเส้นเฮดเท่า ดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียในระบบน้ำบาดาลจะไม่ไหลมาที่เขตเมือง แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการไม่ประมาทที่ทิ้งขยะควรตั้งอยู่บริเวณที่มีเฮดน้ำบาดาลต่ำกว่าเขตเมือง

ในการบริหารจัดการน้ำบาดาล นอกจากจะต้องทราบทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลแล้ว ปริมาณการเคลื่อนที่ก็มีความสำคัญมากเช่นเดียวกัน ปริมาณการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลเป็นไปตามกฎของดาร์ซี่ ซึ่งกล่าวว่าอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาล (Q) เป็นสัดส่วนตรงกับระดับเฮดที่ลดลง (Δh) และพื้นที่ หน้าตัดของการไหล (A) เป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางการไหล (ΔL) ดังแสดงในสมการที่4



รูปที่ 6 ตาข่ายการไหลของระบบน้ำบาดาล

$$Q = -KA\frac{\Delta h}{\Delta L} \qquad (4)$$

เมื่อ K คือ ค่าสัดส่วนคงตัว เรียกว่า สภาพนำชลศาสตร์ (hydraulic conductivity) เครื่องหมายลบแสดงว่าการไหลอยู่ในทิศทางที่เฮดลดลง

เมื่อหารสมการ (4) ด้วย A จะได้

$$\frac{Q}{A} = -K\frac{\Delta h}{\Delta L}$$

$$v = -Ki \qquad (5)$$

เมื่อ v คือ อัตราการไหลจำเพาะ เป็นอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ บางครั้งเรียกว่าความเร็วฟลักซ์ (flux velocity) หรือความเร็วอัตราการไหล (discharge velocity) และ i คือ เกรเดียนต์ของการไหล หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงเฮดต่อระยะทาง

อัตราการไหลจำเพาะ (v) แม้จะมีหน่วยเช่นเดียวกับความเร็ว แต่ไม่ใช่ความเร็วของน้ำบาดาล ความเร็วเฉลี่ยเชิงเส้นของน้ำบาดาล (u) หาได้จาก

การหารอัตราการไหลจำเพาะด้วยค่าความพรุนยังผล (effective porosity, f_e) ดังนี้

$$u = v / f_e \quad (6)$$

สภาพนำชลศาสตร์ คือ ค่าชี้วัดความยากง่ายของการไหลของน้ำผ่านตัวกลางพรุน (porous media) ซึ่งในที่นี้หมายถึงชั้นน้ำ เมื่อสภาพนำชลศาสตร์มีค่าสูง น้ำจะไหลผ่านตัวกลางพรุนได้ง่าย ดังนั้นสภาพนำชลศาสตร์จึงขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนกับความหนืด (viscosity) ของของเหลว ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$K = \frac{\rho g k}{\mu} \quad (7)$$

เมื่อ μ = ความหนืดของของเหลว และ k = สภาพซึมได้ (intrinsic permeability) ซึ่ง เป็นคุณสมบัติของวัสดุพรุนอย่างเดียวไม่เกี่ยวกับของเหลวที่ไหลผ่าน

ค่าสภาพนำชลศาสตร์ของชั้นดินและชั้นหินมีค่าแตกต่างกันถึง 12 ระดับขนาด (order of magnitude) คือตั้งแต่ 10^{-8} เมตรต่อวัน ของหินอัคนีหรือหินแปรที่ไม่มีรอยแตก ไปจนถึง 104 เมตรต่อวัน ของชั้นกรวดสะอาด (ตารางที่ 1) เนื่องจากการแจกแจงของค่าสภาพนำชลศาสตร์เป็นแบบล็อกปกติ (log-normal distribution) ดังนั้นการเฉลี่ยค่าต้องใช้การเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (geometric means) ค่าสภาพนำชลศาสตร์ของชั้นน้ำสามารถคำนวณจากค่าสภาพส่งผ่าน (transmisivity) ซึ่งได้มาจากผลการวิเคราะห์ผลการสูบทดสอบ จากค่าความสัมพันธ์ดังนี้

$$K = T / b \quad (8)$$

ซึ่ง K คือ สภาพนำชลศาสตร์ T คือ สภาพส่งผ่าน และ b คือ ความหนาของชั้นน้ำ

สภาพส่งผ่านหรือความสามารถส่งผ่าน (transmissivity) คือค่าชี้วัดความสามารถในการให้น้ำแก่บ่อบาดาลของชั้นน้ำ สมการ (8) แสดงว่าค่าสภาพส่งผ่าน (T) จะสูงก็ต่อเมื่อค่าสภาพนำชลศาสตร์สูง (K) และ/หรือความหนาของชั้นน้ำมีค่ามาก บ่อบาดาลในชั้นน้ำที่มีค่า สภาพส่งผ่านสูงจะสามารถสูบน้ำได้ในอัตราสูง ชั้นน้ำที่ดีต้องมีค่าสภาพส่งผ่านสูงกว่า 0.015 ตารางเมตรต่อวินาที (Freeze and Cherry, 1979)

ระบบน้ำบาดาลปกติจะเป็นระบบพลวัตเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แม้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงจะไม่รวดเร็วเท่ากับน้ำผิวดินก็ตาม สาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงคือการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาล น้ำบาดาลเคลื่อนที่จากพื้นที่รับน้ำ (recharge area) ไปยังพื้นที่สูญเสียน้ำ (discharge area) ในแต่ละระบบน้ำบาดาลอาจมีพื้นที่รับน้ำหลายแห่ง และพื้นที่สูญเสียน้ำหลายแห่งก็ได้ การได้รับน้ำและการสูญเสียน้ำอาจเกิดเองตามธรรมชาติหรือการกระทำของมนุษย์

การประเมินศักยภาพของระบบน้ำบาดาล จะต้องศึกษาจากสมดุลของระบบน้ำบาดาล ซึ่งในหนึ่งหน่วยเวลา ปริมาณน้ำที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบ (recharge) หักออกด้วยปริมาณน้ำที่เคลื่อนที่ออกจากระบบ (discharge) เท่ากับปริมาณน้ำในระบบที่เปลี่ยนแปลงไป (storage change) แต่ถ้าต้องการทราบปริมาณน้ำที่คงเหลือ จะต้องทราบปริมาณน้ำต้นทุนก่อน ดังนั้นการประเมินน้ำต้นทุนจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญขั้นแรกของการประเมินศักยภาพน้ำบาดาล

ปริมาณน้ำต้นทุนคือ ปริมาณน้ำในชั้นน้ำที่เวลาเริ่มต้นของการวิเคราะห์ศักยภาพของน้ำบาดาล การประเมินปริมาณน้ำต้นทุนเริ่มต้นด้วยการกำหนดขนาดของพื้นที่ในแนวระนาบ (A) ของชั้นน้ำที่ต้องการวิเคราะห์ แล้วกำหนดระยะเฮด (Δh) ที่ต้องเปลี่ยนไป ซึ่งระยะในแนวดิ่งของเฮดที่เปลี่ยนไปนี้ คือระยะที่ระดับน้ำในบ่อบาดาลที่เปลี่ยนไป ดังนั้นถ้าเป็นชั้นน้ำเปิด ระดับเฮดคือระดับน้ำใต้ดิน (water table) แต่ถ้าเป็นชั้นน้ำปิด ระดับเฮด คือ ระดับแรงดันน้ำ ดังนั้น จากความหมายของสภาพเก็บกักหรือสัมประสิทธิ์การเก็บกัก คือปริมาณน้ำที่ได้จากหรือใส่เข้าไปในชั้นน้ำหนึ่งหน่วยพื้นที่ ทำให้เฮดของน้ำบาดาลเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (9)

ตารางที่ 1 ค่าสภาพนำชลศาสตร์ของชั้นดินและหิน

ชนิดวัสดุ	วัสดุ	ค่าสภาพนำชลศาสตร์ (ม./วินาที)
หินร่วน	ดินเหนียว	1×10^{-13} - 4.7×10^{-9}
	ทรายแป้ง, ดินลมหอบ	1×10^{-9} - 2×10^{-5}
	ทรายละเอียด	2×10^{-7} - 2×10^{-4}
	ทรายขนาดกลาง	9×10^{-7} - 5×10^{-4}
	ทรายหยาบ	9×10^{-7} - 6×10^{-3}
	กรวด	3×10^{-4} - 3×10^{-2}
	ตะกอนธารน้ำแข็ง	8×10^{-12} - 2×10^{-4}
หินตะกอน	หินดินดาน	1×10^{-13} - 2×10^{-9}
	หินทรายแป้ง	1×10^{-11} - 1.4×10^{-8}
	หินทราย	3×10^{-10} - 6×10^{-6}
	หินปูน โดโลไมต์	1×10^{-9} - 6×10^{-6}
	คาสต์ หินปูนแนวปะการัง	1×10^{-6} - 2×10^{-2}
	แอนไฮไดรต์	4×10^{-13} - 2×10^{-8}
	เกลือ	1×10^{-12} - 1×10^{-10}
หินอัคนีและหินแปร	หินบะซอลต์ ที่ไม่มีรอยแตก	2×10^{-11} - 4.2×10^{-7}
	หินบะซอลต์ ที่มีรอยแตก	4×10^{-7} - 2×10^{-2}
	หินแกรนิตผุ	3.3×10^{-6} - 5.2×10^{-5}
	หินแกบโบรผุ	5.5×10^{-7} - 3.8×10^{-6}
	หินอัคนีและหินแปรมีรอยแตก	8×10^{-9} - 3×10^{-4}
	หินอัคนีและหินแปรไม่มีรอยแตก	3×10^{-14} - 2×10^{-10}

(จาก Domenico and Schwartz, 1990)

$$S = \frac{\Delta V_w}{A\Delta h} \qquad (9)$$

เมื่อ S คือ สภาพเก็บกัก, ΔV_w คือ ปริมาณน้ำต้นทุน, A คือ พื้นที่ในแนวระนาบของชั้นน้ำ, Δh คือ ระยะเฮดที่เปลี่ยนแปลงไป

สมการ (9) ใช้ในการประเมินปริมาณน้ำต้นทุนทั้งในกรณีชั้นน้ำเปิดและชั้นน้ำปิด สำหรับชั้นน้ำเปิดสภาพเก็บกักมีค่าค่อนข้างสูง คือประมาณ 0.03 ถึง 0.3 ส่วนชั้นน้ำปิดค่า S ค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 10^{-3} ถึง 10^{-6} ดังนั้นเมื่อเฮดเปลี่ยนแปลงไปเท่ากัน ปริมาณน้ำที่ได้จากชั้นน้ำเปิดย่อมมีค่ามากกว่าที่จะได้จากชั้นน้ำปิดประมาณ 100 เท่า

สำหรับการคำนวณในชั้นน้ำปิด เมื่อเฮดลดลงต่ำกว่าขอบบนของชั้นน้ำ จะต้องเริ่มคำนวณแบบชั้นน้ำเปิด โดยค่าสภาพเก็บกัก (S) จะต้องใช้ค่าอัตราให้น้ำจำเพาะ (specific yield, S_y) ตามสมการที่ (12)

7. การจำแนกแหล่งน้ำบาดาล

7.1 แนวทางการจำแนกแหล่งน้ำบาดาล

การจำแนกแอ่งน้ำบาดาล (groundwater basin identification) เพื่อสะดวกในการประเมินศักยภาพของแหล่งน้ำบาดาลร่วมกับการประเมินศักยภาพของแหล่งน้ำผิวดินจะทำให้ทราบภาพรวมของศักยภาพของแหล่งน้ำทั้งหมด แอ่งน้ำบาดาลหมายถึง ระบบน้ำบาดาลของพื้นที่ๆ หนึ่ง ประกอบด้วยชั้นน้ำชั้นเดียวหรือหลายชั้นที่ซ้อนกันหรือเกี่ยวเนื่องกันอยู่ มีขอบเขตเป็นหินทึบน้ำหรือสันปันน้ำใต้ดินหรือแนวลำน้ำที่อาจถือเป็นแนวแบ่งเขตระบบน้ำบาดาลก็ได้

การจำแนกแอ่งน้ำบาดาลจะต้องอาศัยแผนที่อุทกธรณีวิทยาและภาคตัดขวางอุทกธรณีวิทยาเป็นหลัก มีแผนที่ภูมิประเทศและแผนที่ธรณีวิทยาประกอบในการพิจารณา ส่วนผลสำรวจธรณีฟิสิกส์และผลการเจาะสำรวจจะช่วยทำให้การกำหนดจำแนกแอ่งน้ำบาดาลถูกต้องยิ่งขึ้น นั่นคือขอบเขตของแอ่งน้ำบาดาลย่อมเปลี่ยนแปลงได้เสมอเมื่อมีผลสำรวจเพิ่มมากขึ้น

ชั้นน้ำหลักเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของแอ่งน้ำบาดาล ดังนั้นการจำแนกแอ่งน้ำบาดาลต้องถือเอาขอบเขตของชั้นน้ำหลักเป็นเกณฑ์ ขอบล่างของชั้นน้ำหลักส่วนใหญ่คือชั้นทึบน้ำหรือชั้นหินพื้น แต่บางครั้งก็ถือเอาชั้นรอยต่อของน้ำบาดาลจืดและกร่อย ในกรณีที่ชั้นน้ำมีทั้งน้ำจืดและน้ำเค็มปนกัน สำหรับขอบบนของชั้นน้ำย่อมแตกต่างกันระหว่างชั้นน้ำเปิดและชั้นน้ำปิด ขอบบนของชั้นหินให้น้ำเปิดคือระดับน้ำใต้ดิน ส่วนขอบบนของชั้นน้ำปิดคือ ชั้นทึบน้ำ ดังนั้นความหนาของชั้นน้ำปิดย่อมมีค่าคงที่ (อาจมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการบีบตัวของชั้นน้ำและการขยายตัวของน้ำ) ส่วนความหนาของชั้นน้ำเปิดจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล เช่น ฤดูฝนความหนาจะมาก ส่วนฤดูแล้งชั้นน้ำเปิดจะไม่หนามากหรืออาจไม่มีเลยก็ได้ ขอบด้านข้างอาจจะประกอบด้วยชั้นทึบน้ำหรือสันปันน้ำใต้ดินหรือส่วนของน้ำผิวดิน สำหรับขอบที่กั้นด้วยหินทึบน้ำจะมีลักษณะคงที่ ส่วนขอบสันปันน้ำใต้ดินสามารถเปลี่ยนแปลงได้

บางครั้งอาจจำแนกแอ่งน้ำบาดาลย่อยหรืออาจจำแนกตามเขตการปกครอง ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการประเมินศักยภาพ

7.2 ประวัติการจำแนกแหล่งน้ำบาดาลในประเทศไทย

ทรัพยากรน้ำบาดาลแต่ละพื้นที่มีปริมาณและคุณภาพแตกต่างกันตามสภาพแวดล้อมทางอุทกธรณีวิทยาได้แก่ ลักษณะทางภูมิประเทศ ธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา การจำแนกแหล่งน้ำบาดาลของประเทศไทยออกเป็นเขตพื้นที่น้ำบาดาล (hydrogeologic provinces) เพื่อความสะดวกในการศึกษาศักยภาพของแหล่งน้ำบาดาลและเพื่อการพัฒนาน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ จากรายงานการศึกษาที่มีอยู่ในปัจจุบันมีการจำแนกแหล่งน้ำบาดาลของประเทศไทยดังนี้

เจริญ เพียรเจริญ (2525) ได้แบ่งแหล่งน้ำบาดาลของประเทศไทยออกเป็น 6 พื้นที่ ตามสภาพทางภูมิศาสตร์และธรณีวิทยาโครงสร้าง คือ (1) แหล่งน้ำบาดาลเขตพื้นที่สูงในภาคเหนือ และเทือกเขาในภาคตะวันตก (2) แหล่งน้ำบาดาลในเขตพื้นที่ภาคกลางตอนบน (3) แหล่งน้ำบาดาลในเขตพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนใต้ (4) แหล่งน้ำบาดาลในเขตพื้นที่ราบสูงโคราช (5) แหล่งน้ำบาดาลในเขตพื้นที่ภาคตะวันออก และ (6) แหล่งน้ำบาดาลในเขตพื้นที่ภาคใต้ ซึ่งแต่ละภูมิภาคมีลักษณะทางกายภาพของพื้นที่และสภาพของแหล่งน้ำที่แตกต่างกันออกไป

วจี รามณรงค์และสมชัย วงศ์สวัสดิ์ (2542) ศึกษาศักยภาพน้ำบาดาลในภูมิภาคต่างๆ ของประเทศ

และประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในเชิงปริมาณของแอ่งน้ำบาดาลในหินร่วนที่กระจายอยู่ทั่วประเทศจำนวน 12 แอ่ง

การจำแนกแหล่งน้ำบาดาลมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพ เพื่อใช้ในการจัดหาและพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ประโยชน์เป็นหลัก แต่ยังขาดความเชื่อมโยงในการพัฒนาน้ำบาดาลร่วมกับแหล่งน้ำผิวดินในลุ่มน้ำต่างๆ และการประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในเชิงตัวเลขได้ดำเนินการเฉพาะแอ่งน้ำบาดาลในตะกอนหินร่วนที่มีศักยภาพในการพัฒนาขึ้นมาใช้เท่านั้น ดังนั้นในภาพรวมของทั้งประเทศศักยภาพน้ำบาดาลในเชิงปริมาณที่ได้จึงน้อยกว่าความเป็นจริง

ปัจจุบันการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในระดับสากลได้อาศัยหลักการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินเชิงบูรณาการในพื้นที่ลุ่มน้ำ (Integrated Water Resource Management, IWRM) ซึ่งประเทศไทยได้นำแนวคิดนี้มาใช้เป็นแนวทางหลักในการกำหนดนโยบายการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศ โดยจำแนกพื้นที่ลุ่มน้ำผิวดินออกเป็น 9 กลุ่มลุ่มน้ำหลัก การจัดทำแผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลให้มีความสอดคล้องกับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศ จึงจำเป็นต้องพิจารณาเรื่องการจำแนกแหล่งน้ำบาดาลให้สอดคล้องกับพื้นที่ลุ่มน้ำหลักเพื่อให้การศึกษาด้านศักยภาพเชิงปริมาณในแต่ละลุ่มน้ำมีความชัดเจนมากอย่างยิ่ง

7.3 ระบบการกำหนดชื่อและหมายเลขแอ่งน้ำบาดาล

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2549) ได้เสนอให้มีการแบ่งพื้นที่การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลตามกลุ่มลุ่มน้ำหลักของประเทศ จากผลการศึกษาของสำนักงานสภาที่ปรึกษาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (2547) ซึ่งกำหนดกลุ่มลุ่มน้ำจากลุ่มน้ำหลัก 25 ลุ่มน้ำ ตามลักษณะของจุดที่ไหลออกเป็น 9 กลุ่มลุ่มน้ำ ซึ่งการ ศึกษาครั้งนี้เรียกว่า เขตอุทกวิทยา (hydrological region) การกำหนดกรอบพื้นที่ในลักษณะดังกล่าวนี้เป็นการกำหนดพื้นที่เพื่อการบริหารจัดการซึ่งคำนึงถึงความสัมพันธ์ของการจัดการทรัพยากรน้ำผิวดินและน้ำบาดาล และศักยภาพของแหล่งน้ำที่ไม่สามารถแยกพิจารณาออกจากกันได้ในระบบลุ่มน้ำเดียวกัน

การกำหนดชื่อและหมายเลขแอ่งน้ำบาดาลให้สอดคล้องกับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำแบบบูรณาการ กำหนดโดยอาศัยพื้นที่ลุ่มน้ำ พื้นที่กลุ่มลุ่มน้ำ (เขตอุทกวิทยา) เป็นหลักและกำหนดหมายเลขประจำเขตอุทกวิทยา ซึ่งในแต่ละเขตอุทกวิทยาอาจประกอบด้วยแอ่งน้ำบาดาลหลายๆ แอ่ง

7.4 การจำแนกแอ่งน้ำบาดาลตามเขตอุทกวิทยาของประเทศไทย

คณะกรรมการอุทกวิทยาแห่งชาติได้แบ่งพื้นที่ประเทศไทยออกเป็นลุ่มน้ำผิวดินที่สำคัญ 25 ลุ่มน้ำ ซึ่งประกอบด้วยลุ่มน้ำย่อย 254 ลุ่มน้ำ และเมื่อพิจารณาจากบริเวณที่แม่น้ำไหลลง สามารถแบ่งออกเป็น 9 กลุ่มลุ่มน้ำ ได้แก่ (1) กลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำโขง (2) กลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำสาละวิน (3) กลุ่มลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (4) กลุ่มลุ่มน้ำแม่กลอง (5) กลุ่มลุ่มน้ำบางประกง (6) กลุ่มลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตะวันออก (7) กลุ่มลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตะวันตก (8) กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันออก และ (9) กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันตก ซึ่งมีพื้นที่ลุ่มน้ำและลุ่มน้ำหลักดังแสดงในตารางที่ 2 กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2549) ได้แบ่งแอ่งน้ำบาดาลและกำหนดหมายเลขตามหมายเลขของกลุ่มลุ่มน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 7

ตารางที่ 2 กลุ่มลุ่มน้ำหลักและพื้นที่รับน้ำ

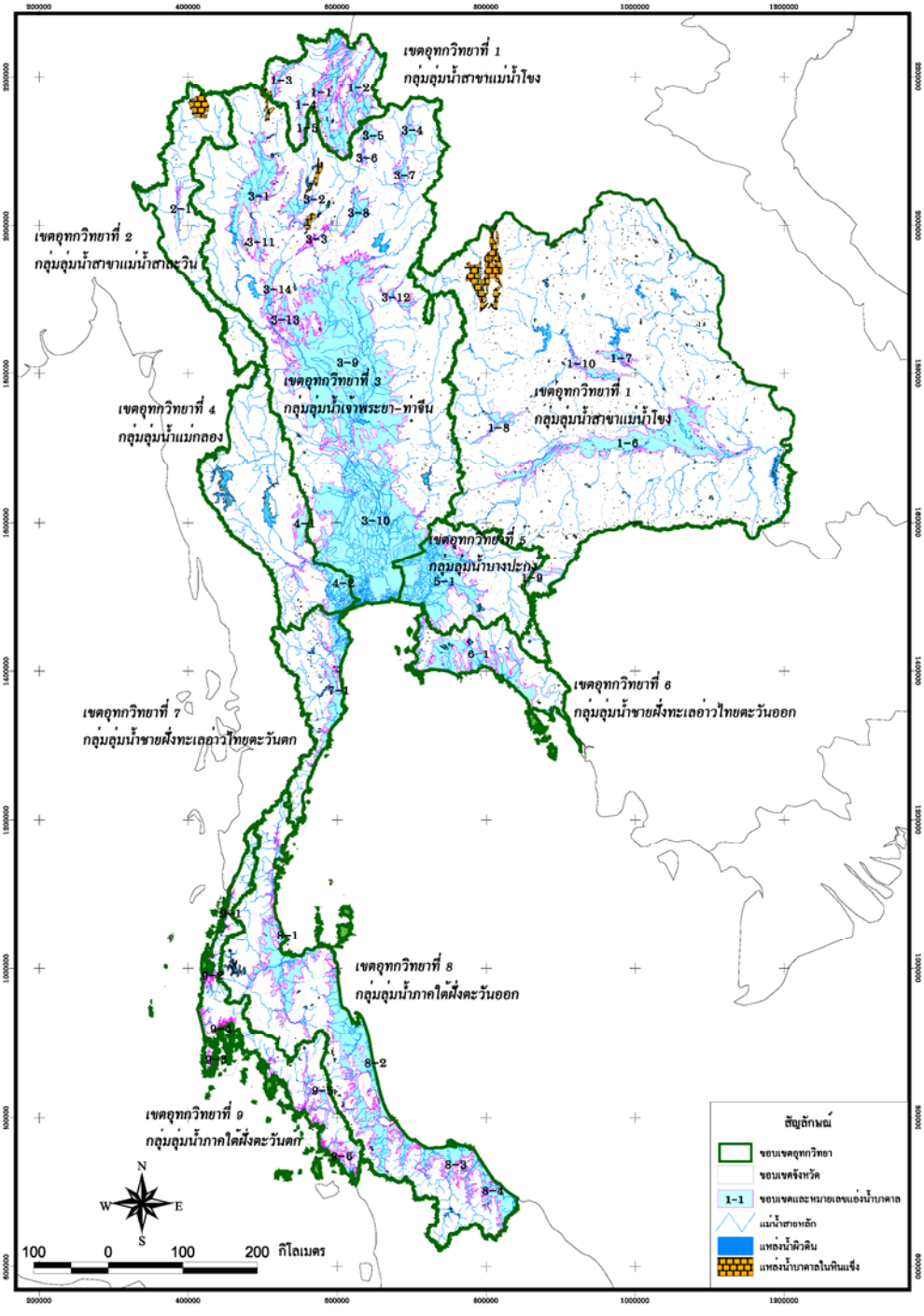
กลุ่มลุ่มน้ำหลัก	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ชื่อลุ่มน้ำหลัก	จำนวนลุ่มน้ำย่อย
1. กลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำโขง	188,645	โขง กก ชี มูล โตนเลสาบ	95
2. กลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำสาละวิน	17,918	สาละวิน	17
3. กลุ่มลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน	157,925	ปิง วัง ยม น่าน สะแกกรัง ป่าสัก เจ้าพระยา ท่าจีน	70
4. กลุ่มลุ่มน้ำแม่กลอง	30,836	แม่กลอง	11
5. กลุ่มลุ่มน้ำบางประกง	18,458	ปราจีนบุรี บางประกง	8
6. กลุ่มลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตะวันออก	13,829	ชายฝั่งทะเลตะวันออก	6
7. กลุ่มลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตะวันตก	12,347	เพชรบุรี ชายฝั่งทะเลตะวันออก	8
8. กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันออก (ด้านอ่าวไทย)	50,930	ภาคใต้ฝั่งตะวันออก ตาปี ทะเลสาบสงขลา ปัตตานี	26
9. กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันตก (ด้านทะเลอันดามัน)	20,473	ภาคใต้ฝั่งตะวันตก	13
รวม	511,361		254

(จาก วีระพล แต้สมบัติ และคณะ, 2550)

ตารางที่ 3 แอ่งน้ำบาดาลของประเทศไทย

เขตอุทกวิทยา	กลุ่มลุ่มน้ำหลัก (ลุ่มน้ำหลัก)	พื้นที่กลุ่มลุ่มน้ำหลัก หน่วย ตร.กม.	แอ่งน้ำบาดาล (หมายเลขแอ่ง)
1	กลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำโขง (โขง กก ชี มูล โตนเลสาบ)	188,645	แอ่งเชียงราย-พะเยา (1-1), แอ่งเชียงของ-เทิง-เชียงคำ-จุน (1-2), แอ่งฝาง (1-3) , แอ่งแม่สรวย (1-4), เวียงป่าเป้า (1-5),แอ่งตะกอนแม่น้ำชี-แม่น้ำมูล (1-6),แอ่งกาฬสินธุ์ (1-7), แอ่งชัยภูมิ (1-8), แอ่งสระแก้ว (1-9), แอ่งมหาสารคาม (1-10)
2	กลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำสาละวิน (สาละวิน)	17,918	แอ่งแม่สะเรียง (2-1)
3	กลุ่มลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (ปิง วัง ยม น่าน สะแกกรัง ป่าสัก เจ้าพระยา ท่าจีน)	157,925	แอ่งเชียงใหม่-ลำพูน (3-1), แอ่งลำปาง (3-2), แอ่งลอง (3-3)แอ่งปัว (3-4), แอ่งปง (3-5), แอ่งเชียงม่วน (3-6), แอ่งน่าน (3-7), แอ่งแพร่ (3-8), แอ่งเจ้าพระยาตอนบน (3-9), แอ่งเจ้าพระยาตอนล่าง (3-10), แอ่งลี้ (3-11), แอ่งชาติตระการ-นครไทย (3-12), แอ่งตาก (3-13), แอ่งเถิน-บ้านตาก (3-14)
4	กลุ่มลุ่มน้ำแม่กลอง (แม่กลอง)	30,836	แอ่งกาญจนบุรี (4-1), แอ่งแม่กลอง (4-2)
5	กลุ่มลุ่มน้ำบางปะกง (ปราจีนบุรี บางปะกง)	18,458	แอ่งบางปะกง (5-1)
6	กลุ่มลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตะวันออก (ชายฝั่งทะเลตะวันออก)	13,829	แอ่งชายฝั่งทะเลตะวันออก (6-1)
7	กลุ่มลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตะวันตก (เพชรบุรี ชายฝั่งทะเลตะวันตก)	12,347	แอ่งเพชรบุรี-ประจวบคีรีขันธ์ (7-1)
8	กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันออกด้านอ่าวไทย (ภาคใต้ฝั่งตะวันออก ตาปี ทะเลสาบสงขลา ปัตตานี)	50,930	แอ่งชุมพร-สุราษฎร์ธานี (8-1), แอ่งนครศรีธรรมราช-พัทลุง-สงขลา (8-2), แอ่งปัตตานี (8-3), แอ่งนราธิวาส (8-4)
9	กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันตกด้านทะเลอันดามัน (ภาคใต้ฝั่งตะวันตก)	20,473	แอ่งระนอง (9-1), แอ่งพังงาเหนือ (9-2), แอ่งพังงาใต้ (9-3), แอ่งพังงาตะวันออก (9-4), แอ่งตรัง (9-5), แอ่งสตูล (9-6)

(จาก กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2549)



รูปที่ 7 แผนที่แสดงเขตอุทกวิทยาและแอ่งน้ำบาดาลของประเทศไทย (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2549)

8 แนวคิดการหาปริมาณน้ำต้นทุน

คุณสมบัติของชั้นน้ำบาดาลประกอบด้วยคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงชลศาสตร์ สำหรับคุณสมบัติเชิงกายภาพประกอบด้วยขนาดพื้นที่และความหนาของชั้นน้ำ ส่วนคุณสมบัติเชิงชลศาสตร์ประกอบด้วย (1) คุณสมบัติด้านการกักเก็บน้ำ ได้แก่ ความพรุน (porosity) อัตราการให้น้ำจำเพาะ (specific yield) สภาพกักเก็บ (storativity) และการเก็บกักจำเพาะ (specific storage) (2) คุณสมบัติด้านการไหลได้แก่ สภาพนำชลศาสตร์ (hydraulic conductivity) และสภาพส่งผ่าน (transmisivity)

ขนาดและความหนาของชั้นน้ำ สามารถประเมินได้ ตามลำดับขั้นดังนี้ (1) ประเมินจากข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ แผนที่ภูมิประเทศ แผนที่ธรณีวิทยา แผนที่อุทกธรณีวิทยา แผนที่น้ำบาดาล และข้อมูลหลุมเจาะ (2) ประเมินจากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ ซึ่งประกอบด้วยการสำรวจทางผิวดิน และการสำรวจทางใต้ดิน ซึ่งวิธีที่สำคัญได้แก่ วิธีการตรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ วิธีการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือน และวิธีการตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ (3) ประเมินจากการเจาะสำรวจ การประเมินขนาดและความหนาของชั้นน้ำ อาจไม่จำเป็นต้องทำครบทั้ง 3 ขั้นตอน ขึ้นอยู่กับความละเอียดของข้อมูลและของงาน

คุณสมบัติของชั้นน้ำที่สำคัญอันดับแรกคือ ความพรุน (porosity, f) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่าง (ประกอบด้วยน้ำและอากาศ) ต่อปริมาตรของชั้นน้ำโดยรวม ในชั้นน้ำหินร่วน (unconsolidated aquifer) ความพรุนเกิดจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินและเม็ดหิน เรียกว่า ความพรุนปฐมภูมิ (primary porosity) ส่วนชั้นน้ำหินแข็ง (consolidated aquifer) ถ้าเป็นหินอัคนีและหินแปร ช่องว่างเกิดจากรอยแตกรอยแยก เรียกว่า ความพรุนทุติยภูมิ กรณีหินตะกอนจะมีช่องว่างทั้งในระหว่างเม็ดหินและในรอยแตก ดังนั้นหินตะกอนส่วนใหญ่จึงมีความทั้งความพรุนปฐมภูมิและทุติยภูมิ

ค่าความพรุนบ่งชี้ถึงปริมาณช่องว่างในชั้นดินและหิน กรณีชั้นดินและหินที่อิ่มตัว วัตถุที่มีความพรุนสูงย่อมมีปริมาณน้ำมาก อย่างไรก็ตามจะมีน้ำเพียงบางส่วนจากน้ำทั้งหมดในช่องว่างที่สามารถระบายด้วยแรงโน้มถ่วงเข้าสู่บ่อบาดาล อัตราส่วนของปริมาณน้ำจากชั้นน้ำ ที่สามารถระบายได้จากแรงโน้มถ่วงเข้าสู่บ่อบาดาล ต่อหน่วยพื้นที่ในแนวระนาบ และต่อระดับน้ำลดลงหนึ่งหน่วย เรียกว่า อัตราให้น้ำจำเพาะ (specific yield) ส่วนปริมาณน้ำที่เหลือค้างอยู่ในชั้นน้ำเรียกว่าอัตราคงค้างจำเพาะ (specific retension) ค่าความพรุนของวัสดุต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความพรุนของชั้นดินและหินชนิดต่างๆ

ดินและหินร่วน	ความพรุน
ดินเหนียว	0.40 - 0.70
ดินทรายแป้ง	0.35 - 0.50
ดินทราย	0.25 - 0.50
กรวด	0.20 - 0.40
ดินทรายกับกรวด	0.15 - 0.35
หินแข็ง	**ความพรุน**
หินทราย	0.05 - 0.35
หินปูนและโดโลไมท์	< 0.01 - 0.20
หินดินดาน	< 0.01 - 0.10
หินผลึก (มีรอยแตก)	< 0.01 - 0.05
หินบะซอลต์โพรง	0.05 - 0.50

(ดัดแปลงจาก Driscoll, 1986, Freeze and Cherry, 1997, และ Roscoe Moss, 1990)

น้ำจากชั้นน้ำไหลเข้าบ่อบาดาลได้ด้วยกลไก 2 ประเภท ได้แก่ การไหลด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและการไหลเนื่องจากการบีบตัวของชั้นหิน อัตราส่วนของน้ำที่ไหลเข้าบ่อบาดาลต่อเฮดที่ลดลงหนึ่งหน่วยต่อ

หน่วยพื้นที่ในแนวระนาบ เรียกว่า สภาพเก็บกัก (storativity) หรือสัมประสิทธิ์การเก็บกัก (storage coefficient) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากการสูบทดสอบ (pumping test) เนื่องจากสภาพเก็บกักเป็นผลรวมของปริมาณน้ำเนื่องจากการระบายด้วยแรงโน้มถ่วง และการไหลด้วยการบีบตัวของชั้นน้ำ จึงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Weight and Sonderegger, 2001)

$$S = S_y + S_s b \quad (10)$$

เมื่อ S คือ สภาพเก็บกัก, S_y คือ อัตราให้น้ำจำเพาะ, S_s คือ การเก็บกักจำเพาะ, และ b คือ ความหนาของชั้นน้ำ

การเก็บกักจำเพาะ (specific storage) คือ ปริมาณน้ำที่ได้จาก (หรือใส่เข้า) ชั้นน้ำ ต่อหน่วยเฮดที่เปลี่ยนไป ต่อหน่วยปริมาตรของชั้นน้ำ การกักเก็บจำเพาะมักจะมีค่าต่ำมาก โดยปกติประมาณ 0.0003 m^{-1} หรือน้อยกว่า (Fetter, 2001) และเป็นฟังชันก์ของสภาพบีบอัดของชั้นหินและของน้ำดังนี้

$$S_s = \rho g(\alpha + f\beta) \quad (11)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ, g คือ ความโน้มถ่วง, α คือ สภาพบีบอัดของชั้นน้ำ, β คือ สภาพบีบอัดของน้ำ และ f คือ ความพรุน ค่าสภาพบีบอัดของชั้นดินและหินต่างๆแสดงในตารางที่ 5

เนื่องจากปริมาณน้ำที่ได้จากชั้นน้ำมาจาก 2 กระบวนการ คือ การระบายออกเนื่องจากแรงโน้มถ่วง และการบีบอัดตัวของชั้นน้ำ ดังนั้นจากสมการ (10) จะได้ว่า สภาพกักเก็บ (S) เป็นผลรวมของอัตราให้น้ำจำเพาะ (S_y) และผลคูณของการกักเก็บจำเพาะ (S_s) กับความหนาของชั้นน้ำ (b) ในกรณีของชั้นน้ำเปิด (unconfined aquifer) ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าบ่อมาจากการระบายด้วยแรงโน้มถ่วงเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นสภาพเก็บกัก (S) ในชั้นน้ำเปิด จึงถือว่ามีค่าเท่ากับอัตราให้น้ำจำเพาะ (S_y) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.03 ถึง 0.3 (Fetter, 2001) ดังแสดงในตารางที่ 6 สมการการหาค่าสภาพเก็บกักสำหรับชั้นน้ำเปิดจึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S = S_y \quad (12)$$

ในชั้นน้ำปิด (confined aquifer) การให้น้ำเป็นไปตามกระบวนการบีบอัดตัวของชั้นน้ำเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น สภาพเก็บกัก(S) ในชั้นน้ำปิดจึงถือว่ามีค่าเท่ากับ ผลคูณของการเก็บกักจำเพาะ (S_s) กับความหนาของชั้นน้ำ (b) เขียนสมการได้เป็น

$$S = S_s b \quad (13)$$

ค่าสภาพเก็บกัก (S) ของชั้นน้ำปิดมีค่าประมาณ 10^{-6} - 10^{-3} ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับค่า S ของชั้นน้ำเปิด (0.03 - 0.3) สำหรับช่วง 0.001 - 0.03 ซึ่งเป็นช่วงต่อจากค่า S ของชั้นน้ำปิดไปยังค่าของชั้นน้ำเปิด ถือว่าเป็นชั้นน้ำปิดรั่ว (leaky confined aquifer) ซึ่งถ้าเป็นค่าต่ำ (ค่าเข้าใกล้ 0.001) ชั้นน้ำก็จะเข้าใกล้ชั้นน้ำปิด ถ้า S มีค่าเข้าสู่ 0.03 ก็เป็นชั้นน้ำรั่วมาก (Weight and Sonderegger, 2001)

ตารางที่ 5 ค่าสภาพบีบอัดของดินและหินชนิดต่าง ๆ

ชนิด	สภาพบีบอัด (m^2/N)
ดินเหนียว	10^{-6}-10^{-8}
ดินทราย	10^{-7}-10^{-9}
กรวด	10^{-8}-10^{-10}
หินแตกและหินตะกอน	10^{-8}-10^{-10}
หินอัคนีและหินแปร	10^{-9}-10^{-11}
น้ำ	4.4×10^{-10}

(จาก Freeze and Cherry, 1979 และ Rescoe Moss, 1990)

ตารางที่ 6 ค่าอัตราให้น้ำจำเพาะ (specific yield, S_y)

ชนิด	วัสดุ	จำนวนวิเคราะห์	อัตราการให้น้ำจำเพาะ	
			ช่วงค่า	ค่าเฉลี่ยเลขคณิต
หินร่วนและหินตะกอน	ดินเหนียว	27	0.01 - 0.18	0.06
	ดินทรายแป้ง	299	0.01 - 0.39	0.20
	ดินทราย(ละเอียด)	287	0.01 - 0.46	0.33
	ดินทราย (ปานกลาง)	297	0.16 - 0.46	0.32
	ดินทราย (หยาบ)	143	0.18 - 0.43	0.30
	กรวด (ละเอียด)	33	0.13 - 0.40	0.28
	กรวด (ปานกลาง)	13	0.17 - 0.44	0.24
	กรวด (หยาบ)	9	0.13 - 0.25	0.21
	หินทรายแป้ง	13	0.01 - 0.33	0.12
	หินทราย (ละเอียด)	47	0.02 - 0.40	0.21
	หินทราย (กลาง)	10	0.12 - 0.41	0.27
	หินปูน	32	0 - 0.36	0.14
หินเกิดจากลม	ตะกอนลมหอบ	5	0.14 - 0.22	0.18
	ทรายลมหอบ	14	0.32 - 0.47	0.38
หินแปร	หินชีสต์	11	0.022 - 0.033	0.026
หินอัคนี	หินเถ้าภูเขาไฟ	90	0.02 - 0.47	0.21

(จาก Anderson and Woessner, 1992)

9 ขั้นตอนการประเมินน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาล

การประเมินปริมาณน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาลมีขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้

9.1 กำหนดพื้นที่แอ่งน้ำบาดาล ซึ่งจะต้องประกอบด้วย ชั้นน้ำหลัก อย่างน้อย 1 ชั้น

9.2 แบ่งแอ่งน้ำบาดาลหลักออกเป็นแอ่งน้ำบาดาลย่อยโดยพิจารณาจากลักษณะเชิงอุทกธรณีวิทยาและคุณภาพน้ำบาดาลที่คล้ายคลึงกัน

9.3 รวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลสูบทดสอบและตัวอย่างหินจากหลุมเจาะ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าอัตราการให้น้ำจำเพาะ ค่าการเก็บกักจำเพาะ และความหนาของแต่ละชั้นน้ำของแต่ละแอ่งน้ำบาดาลย่อย

9.4 สำรวจระดับน้ำในบ่อต่าง ๆ ทั่วทั้งพื้นที่ในช่วงระยะเวลาอันสั้น บันทึกเวลาในการสำรวจ โดยที่ระดับน้ำในบ่อที่ได้น้ำจากชั้นหินอุ้มน้ำเปิดหรือชั้นน้ำชั้นบนสุด เป็นระดับ water table ส่วนระดับน้ำในบ่อที่ได้น้ำจากชั้นน้ำปิดหรือชั้นน้ำปิดรั่ว เป็นระดับ piezometric level ซึ่งแต่ละชั้นน้ำปิดอาจจะมีระดับ piezometric levels ที่แตกต่างกัน

9.5 กรณีชั้นน้ำเปิด หรือชั้นหินต้านน้ำบนสุด คำนวณปริมาณน้ำต้นทุนจากสมการ (14)

$$V_u = S_y Ab \quad (14)$$

เมื่อ V_u คือ ปริมาณน้ำในชั้นน้ำเปิด, S_y คือ specific yield, A คือ พื้นที่ของแอ่งน้ำบาดาลย่อย, และ b คือความหนาของชั้นน้ำ

9.6 กรณีชั้นน้ำปิด หรือชั้นน้ำปิดรั่ว จะต้องคำนวณเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนของชั้นน้ำปิดและขั้นตอนของชั้นน้ำเปิด ทั้งนี้เพราะเมื่อสูบน้ำออกจากชั้นน้ำปิดในขณะที่ระดับ piezometric level ยังอยู่เหนือขอนบนของชั้นน้ำ ก็จะยังเป็นลักษณะของชั้นน้ำปิดต่อเมื่อระดับ piezometric level ลดต่ำลงกว่าขอบบน จะทำให้กลายเป็นชั้นน้ำเปิด

9.6.1 กรณีที่ piezometric level อยู่เหนือขอบบนของชั้นน้ำถือว่าเป็นชั้นน้ำปิด ต้องคำนวณปริมาตรน้ำจาก

$$V_c = S_s bA\Delta h \quad (15)$$

เมื่อ V_c คือปริมาณน้ำในชั้นน้ำปิด, S_s คือ specific storage, b คือ ความหนาของชั้นน้ำ, A คือ พื้นที่ของแอ่งน้ำบาดาลย่อย, และ Δh คือระดับ piezometric เหนือขอบบนของชั้นน้ำปิด

9.6.2 กรณีที่ piezometric level ลดต่ำกว่าขอบบนของชั้นน้ำ ทำให้ชั้นน้ำปิดแต่เดิมกลายเป็นชั้นน้ำเปิด จึงต้องคำนวณปริมาณน้ำต้นทุนด้วยสมการ (14)

9.7 กรณีชั้นน้ำเปิดเดียวกันแต่มีชั้นหินต่างกัน ทำให้มีค่า S_y ต่างกัน การคำนวณปริมาณน้ำต้นทุนต้องทำทีละชั้นแล้วนำมารวมกัน

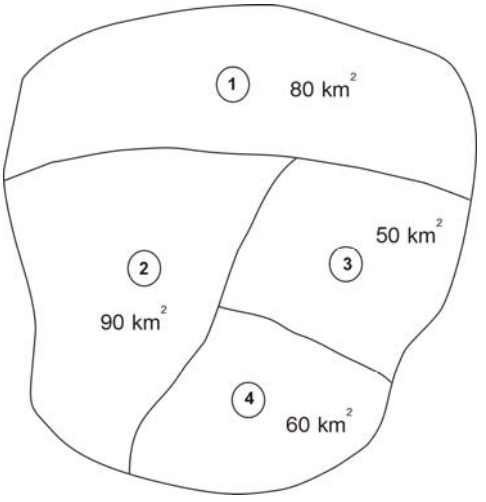
9.8 กรณีของชั้นน้ำปิดเดียวกัน แต่มีชั้นหินต่างกัน ทำให้มีค่า S_s ต่างกัน ต้องทำการเฉลี่ยค่า S_s โดยการถ่วงน้ำหนักตามความหนาของชั้นหิน แล้วใช้ค่า S_s เฉลี่ยในการคำนวณปริมาณน้ำต้นทุน

9.9 ในแต่ละแอ่งน้ำบาดาลย่อย เมื่อรวมปริมาณน้ำทุกชั้นน้ำ ก็จะได้ปริมาณน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาลย่อย

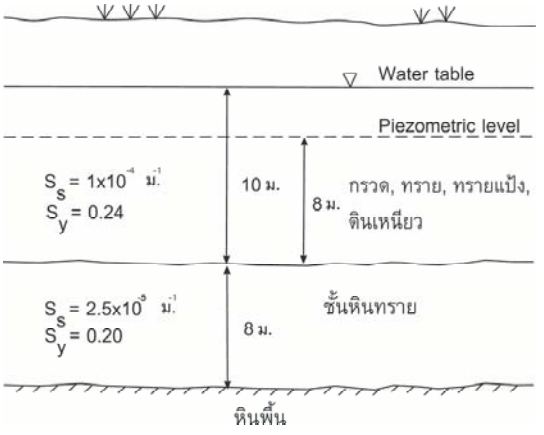
9.10 เมื่อรวมปริมาณน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาลย่อยก็จะได้ปริมาณน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาลหลัก

9.11 สำหรับปริมาณ dead storage จะคิดปริมาณน้ำที่อยู่ใต้ระดับเครื่องสูบ ชั้นน้ำล่างสุด ซึ่งการกำหนดระดับเครื่องสูบย่อมขึ้นกับชนิดของเครื่องสูบ ชนิดวัสดุของชั้นน้ำ ชนิดของท่อกรองและกรวดกรอง และคุณภาพของน้ำบาดาล การคำนวณ dead storage จะต้องคำนวณแบบชั้นน้ำเปิดเสมอ โดยใช้สมการ (14) เมื่อรวมปริมาณ ของทุกแอ่งย่อยก็จะได้ dead storage รวมของแอ่งน้ำบาดาล

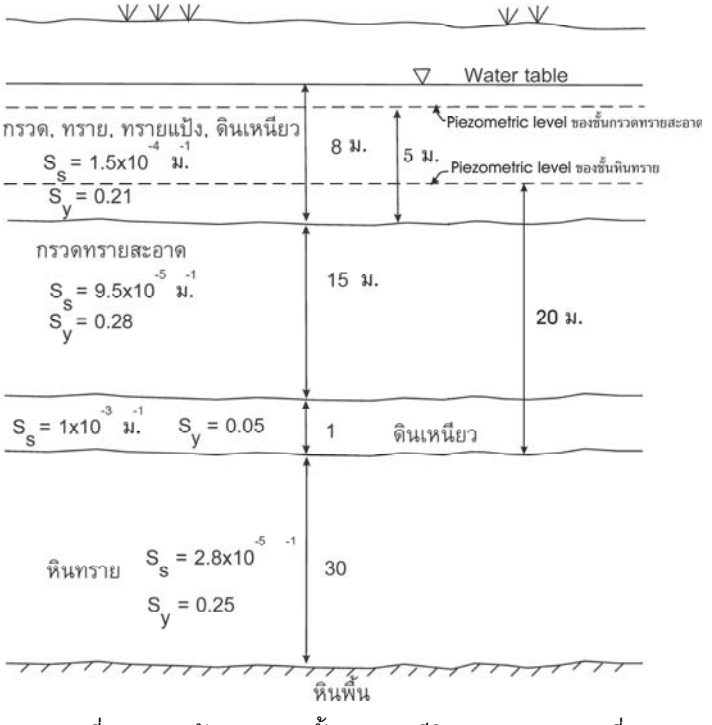
ตัวอย่างที่ 4 พื้นที่แอ่งน้ำบาดาลแห่งหนึ่งขนาด 280 ตร.กม.จากการสำรวจอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่สามารถแบ่งพื้นที่โดยเฉลี่ยได้เป็น 4 แอ่งน้ำบาดาลย่อย ดังแสดงในรูปที่ 8 แอ่งย่อยที่ 1 และ 2 มีลักษณะเป็น recharge area ส่วนแอ่งย่อยที่ 3 และ 4 เป็น discharge area ชั้นน้ำส่วนใหญ่เป็น leaky confine aquifer โดยมีชั้นของกรวด ทราย ทรายแป้ง กับดินเหนียวซึ่งเป็นชั้นต้านน้ำ ปิดทับอยู่ชั้นบน ดังแสดงในรูปที่ 9 ถึง 12 ซึ่งแสดงภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาของแอ่งย่อยที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ ตารางที่ 7 รวบรวมคุณสมบัติเชิงเก็บกักของชั้นน้ำต่างๆ ได้แก่ ชนิดของชั้นหิน ค่า specific storage (S_s), specific yield (S_y), ความหนา (b), ค่าความสูงของ peizometric level เหนือขอบบนของชั้นน้ำ (Δh) และความสูงของเครื่องสูบเหนือขอบล่างของชั้นน้ำหรือระดับน้ำเค็ม จงหาปริมาณน้ำต้นทุนและปริมาณ dead storage



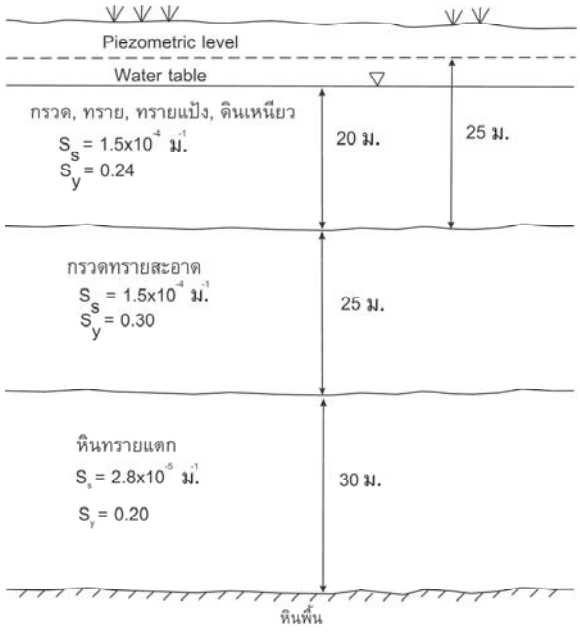
รูปที่ 8 แอ่งน้ำบาดาลหลักและแอ่งน้ำบาดาลย่อย



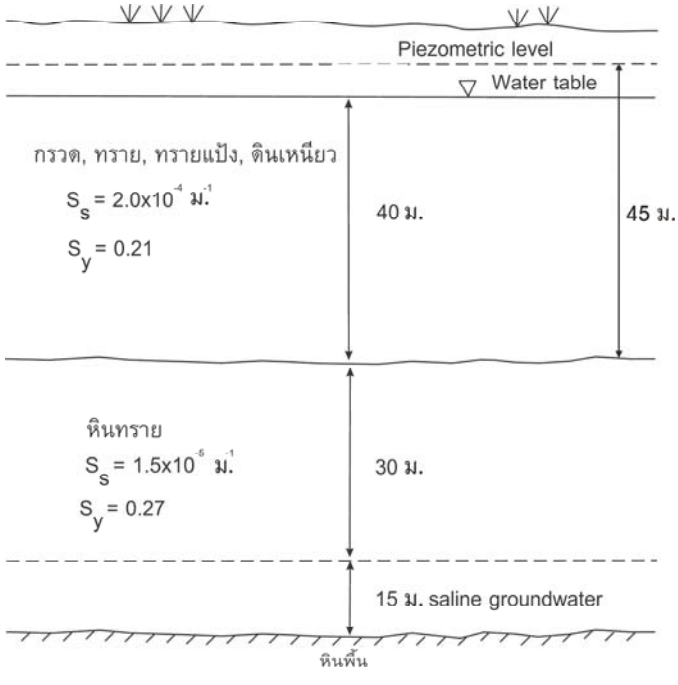
รูปที่ 9 ภาพตัดขวางของชั้นอุทกธรณีวิทยาของแอ่งย่อยที่ 1



รูปที่ 10 ภาพตัดขวางของชั้นอุทกธรณีวิทยาของแอ่งย่อยที่ 2



รูปที่ 11 ภาพตัดขวางของชั้นอุทกธรณีวิทยาของแอ่งย่อยที่ 3



รูปที่ 12 ภาพตัดขวางของชั้นอุทกธรณีวิทยาของแอ่งย่อยที่ 4

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของชั้นน้ำในแอ่งน้ำบาดาลย่อย

แอ่งย่อย	ชั้นหิน	S_s (ม.$^{-1}$)	S_y	B (ม.)	Δh (ม.)	ระดับเครื่องสูบจากพื้น (ม.)
1	ทราย, ดินเหนียว	$1x10^{-4}$	0.24	10	-	-
	หินทรายแตก	$2.5x10^{-5}$	0.20	8	8	1.5
2	ทราย, ดินเหนียว	$1.5x10^{-4}$	0.21	8	-	-
	กรวด, ทราย	$9.5x10^{-5}$	0.28	15	5	-
	ดินเหนียว	$1x10^{-3}$	0.05	1	-	-
	หินทรายแตก	$2.8 x10^{-5}$	0.25	30	20	2
3	ทราย, ดินเหนียว	$1.5 x10^{-4}$	0.24	20	-	-
	กรวด, ทราย	$1.5 x10^{-4}$	0.30	25	25	-
	หินทราย	$2.8 x10^{-5}$	0.20	30	25	2
4	ทราย, ดินเหนียว	$2.0 x10^{-4}$	0.21	40	-	-
	หินทราย	$1.5 x10^{-5}$	0.27	30	45	5

วิธีทำ

แอ่งย่อยที่ 1 พื้นที่ 80 ตร.กม.

<u>ปริมาณน้ำในชั้นต้านน้ำ</u> (ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว) จากสมการ (14)

$$V_{u1} = S_y Ab = 0.24 \times 80 \times 10^6 \times 10$$
$$= 192 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.}$$

<u>ปริมาณน้ำในชั้นหินทรายแตก</u>

กรณีชั้นน้ำปิด จากสมการ (15)

$$V_{c2} = S_s bA\Delta h$$
$$= 2.5 \times 10^{-5} \times 8 \times 80 \times 10^6 \times 8$$
$$= 0.128 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.}$$

กรณีชั้นน้ำเปิด จากสมการ (14)

$$V_{u2} = 0.20 \times 80 \times 10^6 \times 8 = 128 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.}$$

<u>ปริมาณน้ำรวมในแอ่งย่อยที่ 1</u>

$$V_1 = V_{u1} + V_{c2} + V_{u2}$$
$$= 192 \times 10^6 + 0.128 \times 10^6 + 128 \times 10^6$$
$$= 320.128 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.}$$
$$= 320.128 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร}$$

แอ่งย่อยที่ 2 พื้นที่ 90 ตร.กม.

<u>ชั้นต้านน้ำบนสุด</u> (ชั้นทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว) จากสมการ (14)

$$V_{u1} = 0.21 \times 90 \times 10^6 \times 8 = 151.2 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.}$$
$$= 151.2 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร}$$

<u>ชั้นกรวดทราย</u>

กรณีเป็นชั้นน้ำปิด จากสมการ (15)

$$V_{c2} = 9.5 \times 10^{-5} \times 15 \times 90 \times 10^6 \times 5$$
$$= 0.641 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.}$$
$$= 0.641 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร}$$

กรณีเป็นชั้นน้ำเปิด จากสมการ (14)

$$V_{u2} = 0.28 \times 90 \times 10^6 \times 15$$
$$= 378 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.}$$
$$= 378 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร}$$

<u>ชั้นดินเหนียว</u>

ชั้นนี้บางมากและเป็นดินเหนียวถือว่ามีปริมาณกักเก็บน้อยมากจะไม่นำมาใช้ในการคำนวณ

ชั้นหินทรายแตก

กรณีชั้นหินอุ้มน้ำปิด จากสมการ (15)

$V_{c3} = 2.8 \times 10^{-5} \times 30 \times 90 \times 10^{6} \times 20$

$= 1.512 \times 10^{6}$ ลบ.ม.

= 1.512 ล้านลูกบาศก์เมตร

กรณีเป็นชั้นน้ำเปิด จากสมการ (14)

$V_{u3} = 0.25 \times 90 \times 10^{6} \times 30 = 675 \times 10^{6}$ ลบ.ม.

= 675 ล้านลูกบาศก์เมตร

รวมปริมาณน้ำในแอ่งย่อยที่ 2

$V_2 = V_{u1} + V_{c2} + V_{u2} + V_{c3} + V_{u3}$

$= 151.2 + 0.641 + 378 + 1.512 + 675$

= 1206.353 ล้านลูกบาศก์เมตร

แอ่งย่อยที่ 3 พื้นที่ 50 ตร.กม.

ชั้นต้านน้ำบนสุด หาปริมาณน้ำจากสมการ(14)

$V_{u1} = 0.24 \times 50 \times 10^{6} \times 20 = 240 \times 10^{6}$ ลบ.ม.

= 240 ล้านลูกบาศก์เมตร

ชั้นน้ำปิด มี 2 ชั้น ติดต่อกันคือชั้นกรวดทราย $S_s = 1.5 \times 10^{-4}$ ม.$^{-1}$ หนา 25 เมตร และชั้นหินทรายแตก $S_s = 2.8 \times 10^{-5}$ ม.$^{-1}$ หนา 30 เมตร ต้องหาค่า S_s เฉลี่ยจาก

$$S_s = \frac{1.5 \times 10^{-4} \times 25 + 2.8 \times 10^{-5} \times 30}{25 + 30}$$

$= 8.345 \times 10^{-5}$ ม.$^{-1}$

หาปริมาณน้ำจากสมการ(15) ได้เป็น

$V_{c2} = 8.345 \times 10^{-5} \times (25+30) \times 50 \times 10^{6} \times 25$

$= 5.737 \times 10^{6}$ ลบ.ม.

= 5.737 ล้านลูกบาศก์เมตร

กรณีที่เป็นชั้นน้ำเปิด

ชั้นกรวดทรายสะอาด

$V_{u2.1} = 0.30 \times 50 \times 10^{6} \times 25 = 375 \times 10^{6}$ ลบ.ม.

= 375 ล้านลูกบาศก์เมตร

ชั้นหินทรายแตก

$V_{u2.2} = 0.20 \times 50 \times 10^{6} \times 30 = 300 \times 10^{6}$ ลบ.ม.

= 300 ล้านลูกบาศก์เมตร

รวมปริมาณน้ำในแอ่งย่อยที่ 3

$V_3 = V_{u1} + V_{c2} + V_{u2.1} + V_{u2.2}$

$= 240 + 5.737 + 375 + 300$

= 920.737 ล้านลูกบาศก์เมตร

แอ่งย่อยที่ 4 พื้นที่ 60 ตร.กม.

ชั้นต้านน้ำบนสุด หาปริมาณน้ำจากสมการ (14)

$V_{u1} = 0.21 \times 60 \times 10^{6} \times 40 = 504 \times 10^{6}$ ลบ.ม.

= 504 ล้านลูกบาศก์เมตร

ชั้นน้ำปิด เป็นชั้นหินทรายชั้นเดียว หนาทั้งหมด 45 เมตร แต่เฉพาะที่เป็นชั้นของน้ำจืด หนา 30 เมตร ดังนั้นจากสมการ (15) จะได้

$V_{c2} = 1.5 \times 10^{-5} \times 45 \times 60 \times 10^{6} \times 45$

$= 1.823 \times 10^{6}$ ลบ.ม.

= 1.823 ล้านลูกบาศก์เมตร

กรณีเป็นชั้นน้ำเปิด คิดเฉพาะส่วนที่เป็นชั้นน้ำจืดหนา 30 เมตร

จากสมการ (14) จะได้

$V_{u2} = 0.27 \times 60 \times 10^{6} \times 30$

$= 486 \times 10^{6}$ ลบ.ม.

= 486 ล้านลูกบาศก์เมตร

รวมปริมาตรในแอ่งย่อยที่ 4

$V_4 = V_{u1} + V_{c2} + V_{u2} = 504 + 1.823 + 486$

= 991.823 ล้านลูกบาศก์เมตร

ปริมาณน้ำในแอ่งน้ำบาดาลหลักได้จากผลรวมจากปริมาณน้ำจากแอ่งน้ำย่อย ดังนั้น

$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$

$= 320.13 + 1206.35 + 920.74 + 991.82$

= 3439 ล้านลูกบาศก์เมตร

การคำนวณ dead storage

แอ่งย่อยที่ 1 ระดับของเครื่องสูบจากขอบล่างของชั้นน้ำ z = 1.5 เมตร จากสมการ (14) จะได้

$$V_{d1} = S_y Az = 0.2 \times 80 \times 10^6 \times 1.5$$
$$= 24 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.} = 24 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร}$$

แอ่งย่อยที่ 2 ระดับของเครื่องสูบจากขอบล่างของชั้นน้ำ z = 2 เมตร
จากสมการ (14) จะได้

$$V_{d2} = 0.25 \times 90 \times 10^6 \times 2 = 45 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.}$$
$$= 45 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร}$$

แอ่งย่อยที่ 3 ระดับของเครื่องสูบจากขอบล่างของชั้นน้ำ z =2 เมตร
จากสมการ (14) จะได้

$$V_{d3} = 0.20 \times 50 \times 10^6 \times 2 = 20 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.}$$
$$= 20 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร}$$

แอ่งย่อยที่ 4 ระดับของเครื่องสูบจากขอบล่างของชั้นน้ำ z =5 เมตร
จากสมการ (14) จะได้

$$V_{d4} = 0.27 \times 60 \times 10^6 \times 5 = 81 \times 10^6 \text{ ลบ.ม.}$$
$$= 81 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร}$$

รวม dead storage ของทุก ๆ แอ่ง จะได้

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} + V_{d3} + V_{d4}$$
$$= 24 + 45 + 20 + 81$$
$$= 170 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร}$$

ปริมาณ dead storage ของแอ่งน้ำบาดาลหลักมีค่า 170 ล้านลูกบาศก์เมตร

การคำนวณ net storage

ปริมาณเก็บกักสุทธิคำนวณจากปริมาณเก็บกักทั้งหมด ลบด้วย dead storage ดังนี้

$$V_n = V - V_d = 3439 - 170$$
$$= 3269 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร}$$

10. เอกสารอ้างอิง

เจริญ เพียรเจริญ, 2525. อุทกธรณีวิทยาของประเทศไทย, กรุงเทพฯ, กรมทรัพยากรธรณี.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2549. สถานภาพทรัพยากรน้ำบาดาลและการบริหารจัดการของประเทศไทย, เล่มที่ 2/4, โครงการจัดทำแผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วจี รามณรงค์ และสมชัย วงศ์สวัสดิ์, 2541. ทรัพยากรน้ำใต้ดินในประเทศไทย, วารสารชมรมนักอุทกวิทยา, ปีที่ 2.

วีระพล แต้สมบัติ และคณะ, 2541. ทรัพยากรน้ำของประเทศไทย, วารสารชมรมนักอุทกวิทยา ปีที่ 11.

Anderson, M.P., and Woessner, W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, San Diego, California, Academic Press.

Domenico, P.A., and Schwartz, W.W., 1990. Physical and Chemical Hydrogeology, New York, John Wiley.

Driscoll, F.G., 1986. Groundwater and Wells, 2nd ed. Johnson Division, Minnesota, St. Paul.

Fetter, C.W., 2001. Applied Hydrogeology, 4th ed. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.

Freeze, R.A., and Cherry, J.A., 1979. Groundwater, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.

Hiscock, K. 2006. Hydrogeology: Principles and Practice, Malden, USA, Blackwell.

Mansell, M.G, 2003. Rural and Urban Hydrology, London, Thomastelford.

Meinzer, O. E., 1923. Outline of groundwater hydrology with definitions, USGS Water Supply Paper 494, 71 p.

Roscoe Moss Company, 1990. Handbook of ground Water Development, New York, John Wiley.

Todd, D.K., 1980. Groundwater Hydrology, 2 ed. John Wiley and Sons, 535p.

Weight, W.D., and Sonderegger, J.L., 2001. Manual of Applied Field Hydrogeology, New York, McGraw-Hill.

คู่มือ ทบ ป 2000-2550
การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลของแอ่งน้ำบาดาล และการจัดทำแผนการใช้น้ำบาดาล

คู่มือ ทบ ป 2000-2550 เป็นคู่มือการปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล (ป) ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (ทบ) กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ตัวเลขชุดแรกมี 4 ตำแหน่ง หมายถึง ลำดับของคู่มือ ตัวเลขชุดที่สอง "2550" หมายถึง ปี พ.ศ. ที่จัดทำเอกสารต้นฉบับของคู่มือ กรณีที่มีการแก้ไขและปรับปรุงคู่มือให้ใส่วงเล็บต่อท้ายและระบุ ปี พ.ศ. ที่แก้ไขปรับปรุง เช่น (แก้ไขปรับปรุง 2555) เป็นต้น โดยมีเครื่องหมาย [ก] เป็นตัวยกกำกับหน้าข้อความที่แก้ไข และมีเครื่องหมาย [ป] เป็นตัวยกกำกับหน้าข้อความที่ปรับปรุงขึ้นใหม่

1. บทนำ

คู่มือการประเมินศักยภาพการเติมน้ำในแอ่งน้ำบาดาลและการจัดทำแผนการใช้น้ำบาดาลฉบับนี้จัดทำขึ้นภายใต้โครงการจัดทำมาตรฐานและคู่มือการเจาะสำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล พ.ศ. 2550 ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ได้จัดทำเอกสารมาตรฐานและคู่มือชุดนี้ครอบคลุมงานด้านต่างๆ ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งหรือลุ่มน้ำใดลุ่มน้ำหนึ่งเป็นพื้นฐานของการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลที่มีวัตถุประสงค์หลักหลายประการ เช่น (1) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณแหล่งน้ำสำรองและคุณภาพน้ำบาดาลในแต่ละพื้นที่ (2) ปริมาณการไหลเติมของน้ำบาดาลตามกระบวนการทางธรรมชาติ (natural groundwater replenishment) (3) ปริมาณการใช้และปริมาณการสูญเสียน้ำบาดาล (groundwater discharge) (4) สภาพความสมดุลของแหล่งน้ำบาดาล (5) สภาพความเสี่ยงต่อความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำบาดาล (groundwater vulnerability) และ (6) การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลของแหล่งน้ำบาดาลนั้นๆ เพื่อให้เกิดการพัฒนาทรัพยากรน้ำบาดาลขึ้นใช้ประโยชน์ได้อย่างยั่งยืน

กระบวนการจัดทำคู่มือการประเมินศักยภาพน้ำบาดาลที่กรมทรัพยากรน้ำบาดาลชุดนี้ คณะผู้จัดทำได้สำรวจและรับฟังความคิดเห็นเบื้องต้นด้านเนื้อหาสาระ จากผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวตามสำนักประเมินศักยภาพและดุลยภาพน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล เพื่อจัดทำเป็นเอกสารฉบับต้นร่าง (author draft) และนำเอกสารฉบับต้นร่างผ่านการตรวจแก้โดยคณะกรรมการของโครงการ (editorial board) และเผยแพร่โดยการจัดสัมมนารับฟังความคิดเห็นของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญทั้งภายนอกและภายในกรมทรัพยากรน้ำบาดาล เพื่อแก้ไขปรับปรุงและจัดทำเป็นเอกสารฉบับแก้ไข จากนั้นได้เผยแพร่เอกสารฉบับแก้ไขโดยการจัดสัมมนารับฟังความคิดเห็นของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอีกครั้งเพื่อแก้ไขปรับปรุงให้เป็นเอกสารมาตรฐานและคู่มือฉบับสมบูรณ์

คู่มือฉบับนี้ได้ยึดถือรูปแบบของเอกสาร ตามรูปแบบเอกสารมาตรฐานการทดสอบวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Standard for Testing Materiel, ASTM) เป็นต้นแบบ รวมทั้งได้รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจอุทกธรณีวิทยาใต้ผิวดิน (หัวข้อ 3)

การประเมินศักยภาพการเติมน้ำในแอ่งน้ำบาดาลและการจัดทำแผนการใช้น้ำบาดาล เป็นขั้นตอนการดำเนินงานต่อเนื่องจากการประเมินแหล่งน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาล โดยนำข้อมูลต้นทุนน้ำบาดาลที่กักเก็บตามแอ่งน้ำบาดาล (groundwater basins) หรือ

พื้นที่แหล่งน้ำบาดาล (groundwater source areas) ในพื้นที่ต่างๆ รวมกับข้อมูลที่ได้จากการประมาณการปริมาณน้ำบาดาลที่ได้รับการเติมตามกระบวนการทางธรรมชาติ (natural replenishments) มาบริหารจัดการภายในแอ่งน้ำบาดาลหรือภายในพื้นที่แหล่งน้ำบาดาลเพื่อให้สามารถพัฒนาน้ำบาดาลในแอ่งหรือพื้นที่นั้นๆ อย่างเต็มประสิทธิภาพและยั่งยืน

2. ขอบเขต

2.1 คู่มือฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

2.1.1 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปริมาณการเติมน้ำสู่แอ่งน้ำบาดาลตามกระบวนการธรรมชาติ (natural recharges)

2.1.2 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปริมาณการสูญเสียน้ำจากชั้นน้ำบาดาลและการกำหนดปริมาณการใช้น้ำบาดาลทั้งในแอ่งน้ำบาดาล และพื้นที่แหล่งน้ำบาดาล

2.1.3 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลทั้งในแอ่งน้ำบาดาลและพื้นที่แหล่งน้ำบาดาล

2.1.4 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดสรรทรัพยากรน้ำบาดาลทั้งในแอ่งน้ำบาดาลและพื้นที่แหล่งน้ำบาดาล

2.2 คู่มือฉบับนี้สรุปวิธีการวิเคราะห์ใช้สำหรับการประมาณปริมาณการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาลและปริมาณการสูญเสียน้ำจากชั้นน้ำบาดาลแต่ยังไม่ครอบคลุมถึงรายละเอียดด้านทฤษฎี

2.3 หน่วยวัดที่ใช้ในคู่มือฉบับนี้เป็นหน่วยวัดระบบเมตริก

2.4 ข้อความที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานความปลอดภัยในเอกสารฉบับนี้ ครอบคลุมเฉพาะความปลอดภัยในการใช้เครื่องมือที่มีมาตรฐานและอยู่ในสภาพสมบูรณ์พร้อมใช้งานเท่านั้น ไม่อาจครอบคลุมถึงความปลอดภัยในการปฏิบัติงานหรืออุบัติเหตุใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานภาคสนาม ซึ่งจะเป็นความรับผิดชอบของผู้ใช้งานในการปฏิบัติงานด้านต่างๆ ตามขั้นตอนของเอกสารคู่มือฉบับนี้ ผู้ใช้งานจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินทุกขั้นตอนของการปฏิบัติงาน

3. เอกสารที่เกี่ยวข้อง

3.1 กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

- คู่มือ ทบ ป 1000-2550 คู่มือการประเมินแหล่งน้ำต้นทุนของแอ่งน้ำบาดาล
- คู่มือทบ ป 2000-2550 คู่มือการจัดทำแบบจำลองน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์และการประยุกต์ใช้
- คู่มือ ทบ อ 2000-2550 คู่มือการประเมินความเสี่ยงการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล

3.2 เอกสารโครงการภาคีความร่วมมือในทรัพยากรน้ำโลกของธนาคารโลก (GW Mate, The World Bank Global Water Partnership Program, Briefing Note Series)

- Foster, S., 2002. “Thailand: Strengthening Capacity in Groundwater Resources Management” GW Mate, The World Bank Global Water Partnership Program, Briefing Note Series No. 1.
- Foster, S., Tuinhof, A., Kemper, K., Garduño, H., and Nanni, M., 2006. “Characterization of Groundwater Systems Key Concepts and Frequent Misconceptions” GW Mate, The World Bank Global Water Partnership Program, Briefing Note Series No. 2.
- Tuinhof, A., Dumars, C., Foster, S, Kemper, K., Garduño, H., Nanni, M., 2006. “Groundwater Resource Management an Introduction to Its Scope and Practice” GW Mate, The

World Bank Global Water Partnership Program, Briefing Note Series No. 2.

4. ศัพท์บัญญัติ

4.1 พื้นที่แหล่งน้ำบาดาล (groundwater source areas) หมายถึง พื้นที่ที่มีน้ำบาดาลกักเก็บอยู่ในชั้นหินแข็งทุกประเภท

4.2 แอ่งน้ำบาดาล (groundwater basins) หมายถึง น้ำบาดาลในแอ่งตะกอนหินร่วน ทั้งที่เป็นแอ่งน้ำบาดาลเดี่ยว (single simple basin) แอ่งน้ำบาดาลแบบเปิด (opened groundwater basin) และแอ่งน้ำบาดาลที่มีชั้นน้ำบาดาลหลายๆ ชั้น (complex groundwater basin)

5. ความสำคัญและการใช้งาน

5.1 คู่มือฉบับนี้ได้กำหนดขั้นตอนและวิธีการประเมินศักยภาพการเติมน้ำในแอ่งน้ำบาดาลและการจัดทำแผนการใช้น้ำบาดาลเพื่อประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาข้อมูลพื้นฐานสำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่ต่างๆ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลต่างๆ ดังนี้

5.1.1 เป็นคู่มือใช้ในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลและพื้นที่แหล่งน้ำบาดาลทั่วๆ ไป

5.1.2 ประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการกำหนดปริมาณการสูบหรือปริมาณการใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ต่างๆ

5.1.3 ประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการจัดสรรทรัพยากรน้ำบาดาลสำหรับใช้ในวัตถุประสงค์ต่างๆ

5.1.4 คู่มือฉบับนี้ได้เสนอแนวทางสำหรับการจัดตั้งคณะกรรมการการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล สำหรับการปรับใช้ในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลเพื่อบรรเทาแก้ไขปัญหาวิกฤต-การณ์น้ำบาดาลที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

5.2 คู่มือฉบับนี้ ได้กำหนดขั้นตอนและแนวทางการปฏิบัติงานไว้กว้างๆ สำหรับการปรับใช้กับงานด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล ตามวัตถุประสงค์ต่างๆ ซึ่งอาจมีความต้องการรายละเอียดของข้อมูลไม่เหมือนกัน ดังนั้นขั้นตอนและแนวทางการปฏิบัติงานที่ได้กำหนดเอกสารฉบับนี้ อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามที่ผู้เชี่ยวชาญที่เห็นสมควร

6. การประมาณปริมาณน้ำไหลเติมสู่ชั้นน้ำบาดาล

แหล่งน้ำผิวดินที่กักเก็บในรูปแบบต่างๆ ทุกประเภทสามารถซึมลงสู่แอ่งน้ำบาดาลได้ทั้งสิ้น แหล่งน้ำต่างๆ บนน้ำผิวดินล้วนแล้วแต่มีต้นกำเนิดจากน้ำฝน ดังนั้นปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีจึงมีอิทธิพลสูงสุดในการเติมน้ำสู่แอ่งน้ำบาดาลตามกระบวนการทางธรรมชาติ การประมาณการปริมาณการเติมน้ำสู่แอ่งน้ำบาดาลโดยทั่วไปสามารถออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ปริมาณการไหลเติมในช่วงฤดูฝน (monsoon recharge) ซึ่งพื้นที่เขตมรสุมในช่วงฤดูฝนจะมีปริมาณน้ำไหลเติมลงสู่ชั้นน้ำบาดาลประมาณร้อยละ 90 ของปริมาณน้ำไหลเติมลงชั้นน้ำบาดาลทั้งหมด และ (2) ปริมาณการไหลเติมนอกฤดูฝน (non-monsoon recharge) ซึ่งเป็นการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลจากแหล่งน้ำต่างๆ บนผิวดินนอกฤดูฝนประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณน้ำไหลเติมลงชั้นน้ำบาดาลทั้งหมด (Rushton, 1987) สำหรับอัตราการไหลเติมในพื้นที่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับความต่อเนื่องทางชลศาสตร์ระหว่างแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่นั้นๆ โดยความต่อเนื่องทางชลศาสตร์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ในพื้นที่ คู่มือฉบับนี้จะสรุปขั้นตอนและวิธีการประมาณปริมาณน้ำไหลเติมสู่แอ่งน้ำบาดาลดังต่อไปนี้

6.1 การประมาณปริมาณน้ำไหลเติมสู่แอ่งน้ำบาดาลในช่วงฤดูฝน

ปริมาณน้ำที่จะไหลเติมลงสู่แอ่งน้ำบาดาลขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ประการ คือ ความเข้มของฝน

(storm intensity) และระยะเวลาของช่วงฝนตก (storm duration) ดังนั้น ในการประมาณอัตราการไหลเติมน้ำบาดาลจากน้ำฝนจึงจำเป็นต้องอาศัยตัวแปรสำคัญทั้งสองดังกล่าว สำหรับประเทศไทย ฤดูฝน (storm duration) อยู่ในช่วงประมาณ 4 เดือน ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงสิงหาคม ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี ของท้องที่ต่างๆ หาได้จากข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา ส่วนวิธีประมาณการมีมากมายหลายวิธี (Misshra, 1991) ดังตัวอย่างต่อไปนี้

6.1.1 วิธีการประมาณการโดยใช้ความเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในแอ่งน้ำบาดาล (empirical methods) เป็นวิธีการประมาณการปริมาณที่ไหลเติมลงสู่แอ่งน้ำบาดาลจากปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่ตกลงมาในช่วงฤดูฝน โดยประมาณการคร่าวๆ จากกราฟการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในแอ่งน้ำบาดาลระหว่างฤดูกาลเทียบเคียง (correlation) กับปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีของแอ่ง และพัฒนาเป็นสูตรสำเร็จประจำแอ่งน้ำบาดาลนั้นๆ ตัวอย่างเช่น ในแอ่งจตุรวดีในแคว้นปันจาบ ประเทศอินเดีย ได้พัฒนาสูตรการประมาณการปริมาณน้ำฝนที่ไหลเติมลงสู่แอ่งน้ำบาดาลที่เรียกว่า “Amritsar Formula” (Sehgal, 1973) โดย R = 2.5 (P - 16) 0.5 เมื่อ R คือ ปริมาณน้ำฝนที่ไหลเติมลงสู่แอ่งน้ำบาดาล มีหน่วยเป็นนิ้ว และ P คือ ปริมาณน้ำฝนรายปี มีหน่วยเป็นนิ้ว

6.1.2 วิธีการประมาณการโดยหลักการสมดุลทางอุทกวิทยา (hydrologic budget methods) เป็นวิธีการประมาณการปริมาณที่ไหลเติมลงสู่แอ่งน้ำบาดาลจากปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่ตกลงมาในช่วงฤดูฝน โดยมีสมมติฐานว่า ปริมาณน้ำฝนรายปี (P) รวมกับปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าสู่แอ่งน้ำบาดาล (I) จะมีปริมาณเท่ากับปริมาณน้ำท่าที่ไหลออกจากแอ่ง (R) บวกด้วยปริมาณการคายระเหยของน้ำภายในพื้นที่แอ่ง (ET) บวกด้วยปริมาณน้ำผิวดินที่เพิ่มขึ้นภายในแอ่ง (SW) บวกด้วยปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นในชั้นดิน (soil moisture: SM) บวกด้วยปริมาณน้ำบาดาลที่เพิ่มขึ้นภายในแอ่ง (GW) (Misshra, 1991) หรือ

$$P + I = R + ET + SW + SM + GW \qquad (1)$$

6.1.3 วิธีการประมาณการโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงปริมาณการกักเก็บน้ำบาดาลในแอ่ง (groundwater storage method) เป็นวิธีการประมาณการปริมาณที่ไหลเติมลงสู่แอ่งน้ำบาดาลจากการคำนวณหาปริมาณการกักเก็บน้ำบาดาลในแอ่งที่แปรเปลี่ยนไป โดยคำนวณจากค่าคุณสมบัติการให้น้ำจำเพาะของชั้นน้ำ (specific yield, S_y) ปริมาณน้ำไหลเติมสู่ชั้นน้ำบาดาล (R) จะมีปริมาณเท่ากับค่าคุณสมบัติการให้น้ำจำเพาะของชั้นน้ำ (S_y) คูณด้วยความเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในระหว่างฤดูกาล (Δh) (Misshra, 1991) หรือ

$$R = \Delta h * S_y \qquad (2)$$

6.1.4 วิธีการประมาณการปริมาณน้ำไหลเติมสู่แอ่งน้ำบาดาลด้วยวิธีอื่นๆ เช่น วิธีการวิเคราะห์กราฟอุทกการไหลพื้นฐาน (base flow hydrograph) วิธีการวิเคราะห์ทางอุทกเคมี วิธีการใช้สารติดตาม (tracer techniques) วิธีการใช้สารกัมมันตภาพรังสี (isotope techniques) หรือการใช้แบบจำลองอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological modeling techniques) เป็นต้น

6.2 การประมาณปริมาณน้ำบาดาลในฤดูแล้ง

ในฤดูแล้งจะมีปริมาณฝนน้อยมากคือประมาณไม่เกินร้อยละ 20 ของฝนทั้งปี ฝนส่วนใหญ่ในฤดูแล้งจะถูกดินชั้นบนดูดซับไว้แล้วคายระเหยโดยต้นพืชกลับสู่ชั้นบรรยากาศ ดังนั้นปริมาณน้ำที่เติมชั้นน้ำบาดาลในฤดูแล้งจึงมาจากน้ำผิวดิน ได้แก่น้ำในแม่น้ำ คลองส่งน้ำ ทะเลสาบ หนองน้ำธรรมชาติและอ่างเก็บน้ำ

ในกรณีของแม่น้ำและคลองส่งน้ำวิธีปฏิบัติที่ได้ผลคือการวัดอัตราการไหลในลำน้ำโดยแบ่งลำน้ำออกเป็นช่วง ๆ แล้วพิจารณาอัตราการไหลของลำน้ำในแต่ละช่วง ถ้าอัตราการไหลออกมากกว่าอัตราการไหลเข้าแสดงว่าช่วงนี้ของลำน้ำได้รับน้ำจากน้ำบาดาล แต่ถ้าอัตราการไหลเข้ามากกว่าอัตราการไหลออกแสดงว่าช่วงของลำน้ำนั้นเติมน้ำเข้าสู่ระบบน้ำบาดาล ซึ่งอัตราการเติมน้ำมีค่าเท่ากับอัตราการไหลเข้าลบด้วยอัตราการไหลออก

ในกรณีหนองน้ำธรรมชาติ ทะเลสาบ และอ่างเก็บน้ำจะต้องประมาณด้วยวิธีสมดุลน้ำโดยการวัดปริมาณน้ำจากลำน้ำที่ไหลเข้าสู่แหล่งน้ำผิวดินนั้น วัดปริมาณการระเหยและวัดปริมาณเก็บกักที่เปลี่ยนไปในเวลาที่กำหนด ดังนั้นปริมาณเติมน้ำบาดาลย่อมมีค่าเท่ากับปริมาณเก็บกักที่เปลี่ยนไปลบด้วยปริมาณไหลสู่แหล่งน้ำบวกด้วยปริมาณการระเหย

6.3 การประมาณการสูญเสียน้ำบาดาลและการกำหนดปริมาณการสูบน้ำบาดาล

6.3.1 การประมาณการปริมาณการสูญเสียน้ำบาดาล

การสูญเสียน้ำบาดาลจากชั้นน้ำบาดาลนอกจากการสูญเสียน้ำจากการสูบน้ำจากชั้นน้ำบาดาลโดยตรงแล้ว ยังมีการสูญเสียน้ำบาดาลอันเนื่องจากกระบวนการไหลออกจากแหล่งของน้ำบาดาล โดยกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยกรณีต่างๆ ดังนี้

(1) ชั้นน้ำบาดาลอาจสูญเสียน้ำบาดาลจากการซึมซับสู่ผิวดินในลักษณะเป็น “แหล่งน้ำซับ” ซึ่งตรวจวัดปริมาณได้โดยตรงในสนามแต่อัตราการซึมของแหล่งน้ำซับส่วนใหญ่ขึ้นกับฤดูกาล

(2) ชั้นน้ำบาดาลอาจสูญเสียน้ำจากการคายระเหยของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำซึ่งสามารถตรวจวัดปริมาณการคายระเหยของพืชชนิดต่างๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำนั้นได้

(3) น้ำบาดาลอาจสูญเสียน้ำโดย capillary rise สู่ชั้นดินสัมผัสอากาศ (aeration zone)

(4) ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นอาจสูญเสียน้ำจากการไหลออกสู่ลำน้ำ (effluent stream) หรือแหล่งน้ำผิวดินอื่นๆ ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณการสูญเสียน้ำได้โดยการวิเคราะห์การไหลตามกฎของดาร์ซี ดังสมการ

$$Q = - KAi \qquad (3)$$

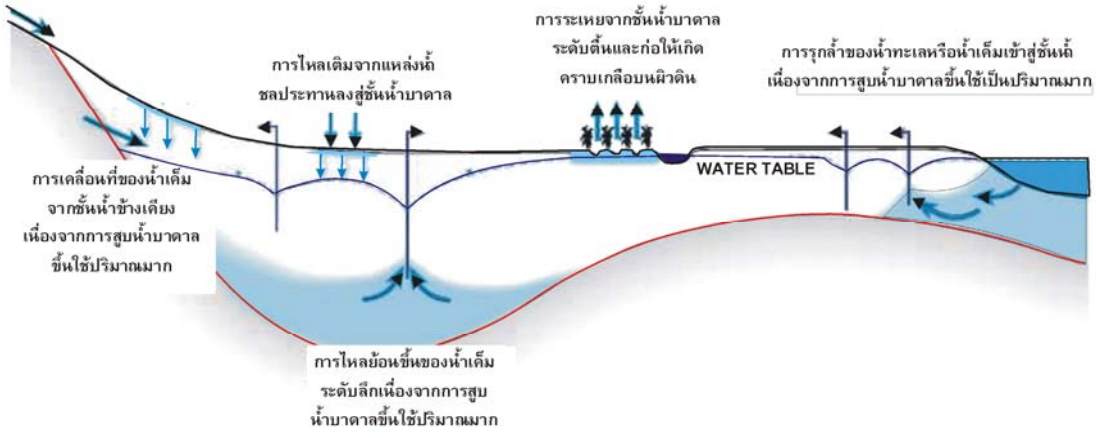
เมื่อ Q เป็นปริมาณน้ำที่ไหลออกจากชั้นน้ำบาดาล K เป็นค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (hydraulic conductivity) ของหินอุ้มน้ำ A คือ พื้นที่ หน้าตัดที่ของหินอุ้มน้ำสัมผัสกับแหล่งน้ำผิวดิน และ i เป็นค่า hydraulic gradient ระหว่างชั้นน้ำบาดาลและแหล่งน้ำผิวดิน

(5) ชั้นน้ำบาดาลหรือหินอุ้มน้ำระดับตื้นอาจสูญเสียน้ำจากการรั่วไหล (leakage) ลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับลึก ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณการสูญเสียน้ำได้โดยการวิเคราะห์หา “leakage factor”

(6) ชั้นน้ำบาดาลต่างๆ อาจสูญเสียน้ำจากการไหลลงสู่ทะเลซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณการสูญเสียน้ำโดยการวิเคราะห์การไหล

6.3.2 การกำหนดปริมาณการสูบน้ำบาดาล

การกำหนดปริมาณการสูบน้ำสูงสุดจากชั้นน้ำใดๆ การควบคุมปริมาณการสูบรวมกับปริมาณการสูญเสียน้ำในกรณีต่างๆ โดยมิให้เกินปริมาณการไหลเติมน้ำเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลแล้ว จำเป็นต้องรักษาระดับน้ำบาดาลให้สามารถดำรงสถานภาพในการควบคุมสภาวะแวดล้อมต่างๆ (Foster et al., 2006) ดังต่อไปนี้คือ



รูปที่ 1 การควบคุมอัตราการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่ต่างๆ ของชั้นน้ำบาดาล (ดัดแปลงจาก Foster et al., 2006)

(1) การสูบน้ำในพื้นที่ต้นน้ำบาดาล (up-stream areas) จำเป็นต้องคำนึงถึงระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ปลายน้ำ (downstream areas) ให้มีระดับสูงเพียงพอสำหรับการใช้น้ำและการรักษาระดับน้ำตามทางน้ำต่างๆ ให้สามารถใช้ในการคมนาคมทางน้ำ รวมทั้งสามารถรักษาระบบนิเวศวิทยาของทางน้ำนั้นๆ

(2) การสูบน้ำในพื้นที่ที่มีชั้นน้ำบาดาลเค็มอยู่ใต้ชั้นน้ำจืด จะต้องควบคุมระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำจืดสำหรับการป้องกันการไหลขึ้น (upconing flow) ของน้ำเค็มที่วางตัวอยู่ข้างล่าง

(3) การสูบน้ำในพื้นที่ใกล้แหล่งน้ำเค็ม จะต้องรักษาระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำจืดเพื่อควบคุมการรุกล้ำของน้ำเค็มเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลจืด

(4) การสูบน้ำในพื้นที่ใกล้แหล่งสารปนเปื้อนบนผิวดิน จะต้องรักษาระดับน้ำบาดาลให้สามารถควบคุมการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาล

7. หลักปฏิบัติการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล

7.1 องค์ประกอบของการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล

การบริหารจัดการทรัพยากรใดๆ ก็ตามจะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีอุปสงค์หรือความต้องการในทรัพยากรนั้นๆ มากกว่าปริมาณของทรัพยากรที่มีอยู่หรืออุปทาน และมีเป้าหมายในการบริหารจัดการทรัพยากรนั้นๆ ให้อยู่ในสมดุลหรือใกล้เคียงกับสมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานอย่างสมเหตุสมผล ในทำนองเดียวกันการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่ใดๆ ก็ตามจะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นใช้มากเกินกว่าขีดความสามารถให้น้ำของชั้นน้ำบาดาลหรือหินอุ้มน้ำในพื้นที่นั้นๆ และก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงต่อชั้นน้ำบาดาล ซึ่งอาจเริ่มต้นด้วยการลดลงของระดับน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่องหรือคุณภาพน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงไปในทางลบ และหากมิได้มีการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ ชั้นน้ำบาดาลจะเสื่อมลง (aquifer deterioration) และทรัพยากรน้ำบาดาลอาจหมดไปจากพื้นที่นั้นๆ หรืออาจก่อให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ติดตามมา

องค์ประกอบสำคัญของการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลจะประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนบริหารจัดการด้านอุปสงค์ (demand-side management) และส่วนบริหารจัดการด้านอุปทาน (supply-side management) ซึ่งทั้งสองส่วนมีผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในทรัพยากรน้ำบาดาลจำนวนมาก โดยทั้งสองส่วนควรยึดหลักการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลดังต่อไปนี้ (Tuinhof et al., 2006)

7.1.1 การบริหารจัดการด้านอุปทานสำหรับฝ่ายอุปทานนอกจากทราบปริมาณการกักเก็บ ปริมาณการไหลเติมน้ำและปริมาณการสูญเสียน้ำจากชั้นน้ำบาดาลโดยการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาลดังกล่าวข้างต้นแล้วยังจำเป็นต้องยึดถือหลักปฏิบัติสำคัญดังนี้

(1) การศึกษาและทำความเข้าใจกับระบบน้ำบาดาล (groundwater systems) และสภาพความอ่อนไหวของชั้นน้ำบาดาลต่างๆ (aquifers susceptibilities) เพื่อลดผลกระทบต่อชั้นน้ำบาดาลต่างๆ ให้อยู่ในสภาพที่ยอมรับได้ ภายใต้แรงกดดันของฝ่ายอุปสงค์ ตัวอย่างเช่น

(1.1) การบริหารจัดการการใช้น้ำบาดาลในเชิงลึก หรือการกระจายสูบน้ำบาดาลจากชั้นน้ำบาดาลทุกชั้นให้เต็มประสิทธิภาพการจ่ายน้ำของชั้นน้ำบาดาลที่ระดับความลึกต่างๆในพื้นที่ดังกล่าว

(1.2) การบริหารจัดการการใช้น้ำบาดาลในเชิงพื้นที่ หรือการกระจายสูบน้ำบาดาลจากชั้นน้ำบาดาลต่างๆ อย่างกระจายไม่กระจุก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการแย่งน้ำระหว่างบ่อน้ำบาดาล

(1.3) บริหารจัดการการสูบน้ำบาดาลเพื่อควบคุมปัญหาการสูบน้ำที่มีผลต่อการเหนี่ยวนำ (induce pumpage) มลภาวะสู่ชั้นน้ำบาดาล ทั้งในพื้นที่ใกล้แหล่งน้ำเค็มหรือพื้นที่ที่มีแนวโน้มเป็นแหล่งปนเปื้อนน้ำบาดาล

(2) การศึกษาและทำความเข้าใจกับความสัมพันธ์ระหว่างชั้นน้ำบาดาลต่างๆ ด้วยกันเอง รวมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งน้ำบาดาลกับแหล่งน้ำผิวดินในพื้นที่ โดยเฉพาะความต่อเนื่องทางชลศาสตร์ (hydraulic continuities) ระหว่างชั้นน้ำบาดาลและความต่อเนื่องทางชลศาสตร์ระหว่างแหล่งน้ำบาดาลกับแหล่งน้ำผิวดิน ตัวอย่างเช่น ผลกระทบต่อแหล่งน้ำผิวดินหรือพื้นที่ชุ่มน้ำต่างๆ จากการสูบน้ำบาดาลขึ้นใช้ หรือในทางตรงกันข้ามการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำผิวดินมีผลกระทบต่อระบบการไหลเติมน้ำบาดาลตามกระบวนการทางธรรมชาติหรือไม่ การติดตั้งระบบบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษาจะเป็นเครื่องมือที่ทรงประสิทธิภาพสำหรับการบริหารจัดการดังกล่าว

7.1.2 การบริหารจัดการด้านอุปสงค์สำหรับฝ่ายอุปสงค์จำเป็นต้องยึดถือหลักปฏิบัติสำคัญดังนี้

(1) ความสำเร็จของการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลจะเกิดขึ้นได้ ภายใต้ความร่วมมือร่วมใจของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่นั้นๆ เท่านั้น

(2) แหล่งน้ำสำหรับการอุปโภคบริโภคและการเกษตรขนาดเล็ก มีความสำคัญอันดับต้นของความต้องการแหล่งน้ำ เนื่องจากมีผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่จะได้รับผลกระทบจากปัญหาความขาดแคลนแหล่งน้ำเป็นจำนวนมาก

(3) ความต้องการแหล่งน้ำของภาคส่วนต่างๆ ต้องได้รับการยอมรับจากสังคมได้ภายใต้การบริหารจัดการการใช้น้ำอย่างดีภายในภาคส่วนนั้นๆ ตัวอย่างเช่น แหล่งน้ำสำรองสำหรับการป้องกันอัคคีภัยในโรงงานอุตสาหกรรมไม่จำเป็นต้องมีคุณภาพเทียบเท่ากับน้ำอุปโภคบริโภค น้ำทิ้งจากโรงงานอาจใช้เป็นแหล่งน้ำสำรองสำหรับการป้องกันอัคคีภัยได้ ท่อส่งน้ำของระบบประปามีการป้องกันการรั่วไหลดีพอหรือไม่ การจ่ายน้ำเป็นเวลาและการ

สำรองน้ำไว้ใช้ในครัวเรือนสำหรับระบบประปาหมู่บ้านขนาดเล็ก อาจใช้แก้ไขปัญหาเบื้องต้นจากการรั่วไหลของระบบท่อส่งน้ำได้ แหล่งน้ำสำหรับการเกษตรจะต้องมีการบริหารจัดการทั้งระบบส่งน้ำ ระบบการให้น้ำ รวมไปถึงความคุ้มทุนในการใช้แหล่งน้ำในระดับที่สามารถยอมรับได้

7.1.3 หลักปฏิบัติอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล

เนื่องจากระดับความซับซ้อนทางอุทกธรณีวิทยา ระบบเศรษฐกิจและสังคมในแต่ละท้องที่มีความแตกต่างกันมากทำให้การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลไม่สามารถกำหนดเป็นรูปแบบที่คงที่ การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือร่วมใจของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่างๆ ทั้งในระดับท้องถิ่น ระดับภูมิภาค และระดับประเทศ

7.2 การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลในแอ่ง

จากสภาพปัญหาในปัจจุบันทรัพยากรน้ำสำหรับตอบสนองความต้องการของประชากรผู้ใช้น้ำและการพัฒนาด้านเศรษฐกิจของประเทศที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้การพัฒนาทรัพยากรน้ำบาดาลของประเทศมุ่งเน้นการพัฒนาน้ำบาดาลขึ้นใช้ให้ทันต่อความต้องการแหล่งน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามแอ่งน้ำบาดาลหลัก เช่นแอ่งเจ้าพระยาตอนล่างและแอ่งเจ้าพระยาตอนบนซึ่งเป็นแอ่งน้ำบาดาลที่สำคัญที่สุดของประเทศมีการพัฒนาน้ำบาดาลจนก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำบาดาลและสิ่งแวดล้อม เกษตรกรพัฒนาน้ำบาดาลโดยการเจาะบ่อระดับตื้น ในแต่ละแอ่งมีบ่อน้ำบาดาลระดับตื้นไม่น้อยกว่า 20,000 บ่อ จนทำให้ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นในแอ่งทั้งสองมีระดับน้ำบาดาลลดลงไม่น้อยกว่า 10 เมตรในช่วงระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา ในขณะที่ชั้นน้ำบาดาลระดับลึกได้พัฒนาขึ้นใช้ทั้งเป็นแหล่งในการผลิตของภาคอุตสาหกรรมและแหล่งน้ำสำหรับการอุปโภคบริโภค จนก่อให้เกิดผลกระทบเป็นหย่อมๆ ทั้งปัญหาด้านการลดลงอย่างต่อเนื่องของระดับน้ำบาดาล ปัญหาการปนเปื้อนแหล่งน้ำบาดาล รวมไปถึงปัญหาแผ่นดินทรุดในพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล

กรมทรัพยากรน้ำบาดาลเป็นหน่วยงานภาครัฐเพียงหน่วยงานเดียวที่มีภารกิจโดยตรงในด้านการพัฒนาและอนุรักษ์ทรัพยากรน้ำบาดาลของประเทศ ตระหนักถึงปัญหาต่างๆ ดังกล่าวเป็นอย่างดี และได้ควบคุมการพัฒนาน้ำบาดาลของประเทศด้วยมาตรการด้านกฎหมายตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาล ตั้งแต่ปี 2520 และแก้ไขปรับปรุงพระราชบัญญัติน้ำบาดาลหลายครั้ง จนทำให้ปัญหาต่างๆ คลี่คลายได้ในระดับหนึ่ง แต่เนื่องจากความต้องการทรัพยากรน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามการเพิ่มของประชากรผู้ใช้น้ำและการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล เพื่อให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในทรัพยากรน้ำบาดาลของประเทศ ทั้งผู้ใช้น้ำบาดาลในภาคส่วนต่างๆ นักวิชาการอิสระและท้องถิ่น นักสิ่งแวดล้อมอิสระและท้องถิ่น ผู้บริหารท้องถิ่นและส่วนกลาง ให้มีส่วนร่วมในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลของประเทศ จึงเป็นความจำเป็นเร่งด่วน กรมทรัพยากรน้ำบาดาลทำหน้าที่เป็นเจ้าภาพ การศึกษาและเผยแพร่ข้อมูลแหล่งทรัพยากรน้ำบาดาลในท้องถิ่นต่างๆ รวมทั้งการกำหนดภาพรวมของปริมาณการใช้น้ำบาดาลสำหรับการจัดสรรการใช้น้ำบาดาลอย่างเหมาะสมพอเพียง เพื่ออนุรักษ์ทรัพยากรน้ำบาดาลให้สามารถใช้ได้อย่างยั่งยืน แนวทางการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลในแอ่ง (basin-wide groundwater management) มีดังรายละเอียดต่อไปนี้

(1) ถึงแม้ในปัจจุบันการเจาะบ่อน้ำบาดาลระดับตื้นสำหรับภาคการเกษตรไม่จำเป็นต้องขออนุญาตเจาะและใช้น้ำบาดาล แต่จากการขยายตัวการใช้น้ำบาดาลอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดผลกระทบต่อชั้นน้ำบาดาลในแอ่งทั้งสองอย่างรุนแรง จำเป็นต้องกำหนดแนวทางการควบคุมการเจาะในใช้น้ำบาดาลในชั้นน้ำดังกล่าว ตามข้อเสนอของคณะผู้เชี่ยวชาญจากโครงการภาคีความร่วมมือในทรัพยากรน้ำโลกของธนาคารโลก (Foster, 2002)

(2) จำเป็นต้องศึกษากลไกและปริมาณการไหลเติมน้ำลงในชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น รวมไปถึงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นและระดับลึก สำหรับเป็นข้อมูลในการบริหารจัดการน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลดังกล่าว (Foster, 2002)

(3) จำเป็นต้องประเมินศักยภาพปริมาณการกักเก็บและการสูญเสียน้ำบาดาล รวมไปถึงความอ่อนไหวของชั้นน้ำบาดาลระดับต่างๆ ในแอ่งน้ำบาดาลทั้งสอง

(4) จำเป็นต้องนำเสนอข้อมูลต่างๆ เปิดเผยต่อสาธารณะ โดยเฉพาะในท้องถิ่นระดับอำเภอหรือตำบลต่างๆ ที่มีการใช้น้ำบาดาลปริมาณสูง

(5) จำเป็นต้องบริหารจัดการทรัพยากรแหล่งน้ำบาดาล รวมทั้งการจัดทำแผนการใช้น้ำบาดาลสำหรับภาคส่วนต่างๆ เฉพาะสำหรับท้องถิ่นต่างๆ โดยผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทุกภาคส่วนต้องมีส่วนร่วม

(6) จำเป็นต้องศึกษาความเป็นไปได้และเป็นโครงการนำร่องในการใช้บ่อน้ำบาดาลกลางสำหรับการจ่ายน้ำบาดาลระดับตื้นให้เกษตรกรแทนบ่อส่วนตัว จำนวนประมาณ 20,000 บ่อ ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องสูบน้ำที่เกษตรกรใช้ในปัจจุบันเกือบทั้งหมดใช้เครื่องยนต์เป็นต้นพลังในการฉุดเครื่องสูบน้ำ หากเป็นเพิ่มบ่อขนาดกลาง 1 บ่อแทนบ่อเดิม 10 บ่อ จะลดค่าใช้จ่ายด้านวัสดุเชื้อเพลิงให้เกษตรกรได้ รวมทั้งสามารถควบคุมปริมาณการสูบได้ง่ายขึ้น

(7) จำเป็นต้องศึกษาความเป็นไปได้และเป็นโครงการนำร่อง ในการเติมน้ำบาดาลในชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น (rain-water harvesting) อย่างจริงจัง โดยต่อยอดจากโครงการเดิมที่มีอยู่ นอกจากการเพิ่มปริมาณการกักเก็บน้ำในชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นแล้ว ยังสามารถบรรเทาปัญหาน้ำท่วมในลุ่มน้ำทั้งสอง

7.3 การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่แหล่งน้ำบาดาล

โดยทั่วไปแหล่งน้ำบาดาลในชั้นหินแข็งหรือพื้นที่แหล่งน้ำบาดาลถูกจัดลำดับให้เป็นชั้นน้ำบาดาลระดับรอง (minor aquifers) ในขณะที่น้ำบาดาลในแอ่งตะกอนหินร่วนเป็นหินอุ้มน้ำหลัก แต่โดยข้อเท็จจริงแล้ว พื้นที่แหล่งน้ำบาดาลมีความสำคัญเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งมีจำนวนประชากรและพื้นที่ประมาณ 1 ใน 3 ของประเทศ บ่อน้ำบาดาลที่เจาะในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือกว่าร้อยละ 90 ล้วนแต่ได้น้ำบาดาลจากชั้นหินแข็ง

สถานภาพของการพัฒนาน้ำบาดาลพื้นที่แหล่งน้ำบาดาล ส่วนใหญ่เป็นการพัฒนาขึ้นใช้สำหรับการอุปโภคบริโภคซึ่งมีปริมาณการสูบน้ำไม่มากนัก อย่างไรก็ตามการประเมินศักยภาพในพื้นที่แหล่งน้ำบาดาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยชั้นหินชุดภูทอก (หินทราย หินทรายแป้ง และหินดินดาน) และชั้นหินปูน ซึ่งเป็นพื้นที่แหล่งน้ำบาดาลที่มีศักยภาพสูงก็เป็นงานที่จำเป็นอย่างยิ่ง จากสถานภาพการพัฒนาน้ำบาดาลในปัจจุบันบัน พบว่าพื้นที่แหล่งน้ำบาดาลบางแห่งมีระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างรวดเร็ว เช่น บริเวณตำบลท่าพระ อำเภอบ้านแฮด จังหวัดขอนแก่น ถึงแม้ว่าชั้นหินภูทอกมีขีดความสามารถใน

การให้น้ำบาดาลสูง (มากกว่า 100 ลบ.ม./ชม.) (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2542 และ Srisuk et al., 2003) แต่ในบริเวณที่เป็นพื้นที่ของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มีระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างรวดเร็ว จากระดับน้ำปริ่มปากบ่อในปีประมาณ 2520 ปัจจุบันมีระดับน้ำประมาณ 40 เมตร รวมทั้งมีแนวโน้มที่จะเกิดการปนเปื้อนแหล่งน้ำบาดาลในอนาคตจากบ่อน้ำทิ้งต่างๆ ค่อนข้างสูง น้ำบาดาลในชั้นหินปูนในเขตพื้นที่อำเภอมวกเหล็กสระบุรี ก็มีปัญหาการปนเปื้อนจากพื้นที่แหล่งฝังกลบขยะในพื้นที่ข้างเคียง ปัญหาการปนเปื้อนน้ำบาดาลในแหล่งหินปูนมักเป็นปัญหาใหญ่เนื่องจากรูปแบบการไหลของน้ำบาดาลในหินปูนส่วนใหญ่มีลักษณะเป็น open-channel flow ซึ่งควบคุมการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนได้ยาก สำหรับขั้นตอนและแนวทางการดำเนินงานการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่แหล่งน้ำบาดาลสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) จัดทำแผนที่อุทกธรณีวิทยาขั้นรายละเอียด แสดงพื้นที่แหล่งน้ำบาดาลในชั้นหินดังกล่าว พร้อมแสดงพื้นที่ที่อาจเป็นแหล่งปนเปื้อนน้ำบาดาล

(2) จำแนกชั้นน้ำบาดาล (aquifers identifications) ที่ระดับความลึกต่างๆ ในพื้นที่แหล่งน้ำบาดาลนั้นๆ ด้วยวิธีการทางธรณีวิทยาและธรณีฟิสิกส์ และการเทียบเคียงข้อมูลการเจาะ

(3) ศึกษาด้านกลไกของชั้นน้ำบาดาลต่างๆ (aquifers mechanisms) โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปแบบการไหลของน้ำบาดาลในชั้นน้ำ (flow patterns) โดยการติดตามการเจาะบ่ออย่างใกล้ชิด

(4) สำรวจและศึกษาคุณสมบัติชั้นน้ำต่างๆ (aquifers characteristics)

(5) ประมาณการปริมาณการกักเก็บ ปริมาณการไหลเติมและปริมาณการสูญเสียน้ำบาดาลด้วยวิธีการต่างๆ

(6) ทำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นน้ำบาดาลในหินแข็ง

8 แนวทางการจัดทำแผนการจัดสรรทรัพยากรน้ำบาดาล

สิทธิแห่งน้ำ (water right) ถือว่า “แหล่งน้ำ” เป็นสมบัติสาธารณะ มนุษย์ทุกคนมีสิทธิในการเข้าถึงและใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำเท่าเทียมกัน มาตรการทางกฎหมายไม่อาจใช้บังคับเหนือสิทธิขั้นพื้นฐานแห่งความต้องการแหล่งน้ำสำหรับการดำรงชีพ (water for life) แต่คำจำกัดความของ “แหล่งน้ำสำหรับการดำรงชีพ” มิได้กำหนดขอบเขตเพียงน้ำอุปโภคบริโภคเท่านั้น บางกลุ่มอ้างว่าน้ำสำหรับการเกษตรในครัวเรือนเป็นแหล่งน้ำสำหรับการดำรงชีพ และบางกลุ่มอาจอ้างว่าน้ำสำหรับอุตสาหกรรมในครัวเรือนก็เป็นแหล่งน้ำสำหรับการดำรงชีวิต เช่นกัน ดังนั้นเมื่อปริมาณแหล่งน้ำจำกัด ทางออกที่ดีที่สุดสำหรับสังคมคือการจัดสรรน้ำอย่างเป็นธรรม ในทำนองเดียวกันการจัดทำแผนการใช้น้ำบาดาลหรือการจัดสรรทรัพยากรน้ำบาดาลสำหรับท้องถิ่นต่างๆ ที่มีการใช้น้ำบาดาลสูงเกินขีดความสามารถการให้น้ำของท้องถิ่นนั้นๆ ต้องดำเนินการภายใต้เป้าหมายสูงสุดคือรักษาสภาพสมดุลของแหล่งน้ำบาดาลให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อให้สามารถอนุรักษ์แหล่งน้ำบาดาลในท้องถิ่นนั้นไว้ใช้อย่างยั่งยืน ในขณะเดียวกันภาคส่วนต่างๆ ของฝ่ายผู้ใช้น้ำบาดาลสามารถวางแผนการใช้น้ำภายใต้สภาวะความจำกัดของแหล่งน้ำบาดาล

8.1 องค์ประกอบของการจัดแผนการใช้ทรัพยากรน้ำบาดาล

การจัดทำแผนการใช้ทรัพยากรน้ำบาดาลในปัจจุบันถือได้ว่าเป็นมาตรการหนึ่งที่ใช้ในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลในท้องที่ที่อุปสงค์สูงกว่าอุปทานหรือพื้นที่ที่เกิดวิกฤตการณ์น้ำบาดาล

โดยองค์ประกอบสำคัญของการจัดทำแผนการใช้น้ำบาดาลประกอบด้วย 2 ฝ่าย ดังนี้คือ

8.1.1 ฝ่ายบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล หรือฝ่ายอุปทาน ซึ่งเป็นฝ่ายกำหนดปริมาณน้ำบาดาลสูงสุดที่สามารถสูบขึ้นใช้ได้ในพื้นที่ที่เกิดวิกฤตการณ์น้ำบาดาลต่างๆ โดยต้องนำเสนอข้อมูลที่ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อ 7.1 และ 7.2 ต่อสาธารณชน รวมทั้งการประชาสัมพันธ์ถึงผลกระทบต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มิได้มีการบริหารจัดการน้ำบาดาลในพื้นที่นั้นๆ ประกอบกับการใช้มาตรการด้านกฎหมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดทำทะเบียนบ่อน้ำบาดาลต่างๆ

8.1.2 ฝ่ายบริหารจัดการผู้ใช้น้ำในพื้นที่เกิดวิกฤตการณ์น้ำบาดาลหรือฝ่ายอุปสงค์ ซึ่งประกอบด้วยผู้ใช้น้ำจากภาคส่วนต่างๆ เช่นผู้รับสัมปทานจัดทำระบบประปาในท้องถิ่น ผู้ใช้น้ำภาคการเกษตร และผู้ใช้น้ำภาคอุตสาหกรรมเป็นต้น โดยฝ่ายอุปสงค์จะต้องได้รับข้อมูลเกี่ยวกับทรัพยากรน้ำบาดาลในท้องถิ่นนั้นๆ อย่างถูกต้องทั้งด้านปริมาณน้ำบาดาลที่สามารถสูบขึ้นใช้โดยก่อให้ผลกระทบทั้งที่เป็นผลกระทบโดยตรงต่อแหล่งน้ำบาดาลในท้องถิ่นและผลกระทบทางอ้อมต่อสภาพสิ่งแวดล้อมภายในและภายนอกท้องถิ่น รวมทั้งตระหนักถึงความสำคัญของความต้องการแหล่งน้ำของฝ่ายต่างๆ

8.1.3 ฝ่ายทำหน้าที่เป็นผู้ถ่วงดุลหรือฝ่ายเป็นกลาง ซึ่งประกอบด้วย ซึ่งประกอบด้วยนักวิชาการอิสระส่วนกลาง (NGO สิ่งแวดล้อม) นักวิชาการอิสระส่วนท้องถิ่น (NGO ท้องถิ่น) และผู้บริหารท้องถิ่นโดยทำหน้าที่ด้านต่างๆ โดยสรุปดังนี้

(1) NGO สิ่งแวดล้อม เรียกร้องแหล่งน้ำสำหรับการรักษาสภาพสิ่งแวดล้อมทั้งภายในและภายนอกท้องถิ่น เช่นพื้นที่แหล่งชุ่มน้ำและระบบนิเวศน์ รักษาระดับน้ำในธารน้ำสายต่างๆ สำหรับการคมนาคมทางน้ำและระบบนิเวศน์ทางน้ำต่างๆ

(2) NGO ท้องถิ่นเรียกร้องสิทธิการใช้น้ำของประชาชนในท้องถิ่นและแหล่งน้ำตามวิถีชีวิตของประชาชนในท้องถิ่น

(3) ผู้บริหารท้องถิ่นทำหน้าที่ประสานงานลดความขัดแย้งเพื่อให้การจัดทำแผนการใช้ทรัพยากรน้ำบาดาลสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้เหตุและผลที่สามารถยอมรับได้ในท้องถิ่นนั้นๆ

8.2 แผนการลดปริมาณการใช้น้ำบาดาล

8.2.1 การลดปริมาณการใช้น้ำบาดาลในภาคอุตสาหกรรม

ผู้ใช้น้ำภาคอุตสาหกรรมจะต้องคำนึงถึงการลดปริมาณการใช้ทรัพยากรน้ำ ซึ่งในปัจจุบันมีเทคโนโลยีมากมาย ทั้งที่เป็นเทคโนโลยีง่ายๆ ตั้งแต่การใช้น้ำหมุนเวียน (reuse) การปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อน้ำกลับมาใช้ใหม่ (recycle) ไปจนกระทั่งการปรับปรุงกระบวนการผลิต และการปรับปรุงเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่ม ประเภทน้ำอัดลม มีสัดส่วนการใช้น้ำต่อผลผลิต เท่ากับ 7:1 ปัจจุบันสามารถลดสัดส่วนลงมาให้เหลือเพียง 4:1 ในขณะที่อุตสาหกรรมสิ่งทอเคยมีสัดส่วนการใช้น้ำต่อผลผลิต เท่ากับ 200:1 ปัจจุบันสามารถลดสัดส่วนลงมาให้เหลือเพียง 80:1 เป็นต้น การลดปริมาณการใช้ทรัพยากรน้ำ นอกจากจะเป็นการสงวนทรัพยากรของประเทศแล้ว ยังมีส่วนช่วยในด้านของการรักษาสภาพสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

8.2.2 การลดปริมาณการใช้น้ำบาดาลในภาคเกษตรกรรม

มีวิธีการลดปริมาณการใช้น้ำโดยสรุปดังนี้ (Foster et al., 2006)

(1) มาตรการลดปริมาณน้ำโดยการก่อสร้าง (engineering measures) เช่น การใช้ระบบท่อส่งน้ำแรงดันต่ำแทนระบบคลองส่งน้ำ หรือการ

ก่อสร้างระบบน้ำหยดหรือระบบสปริงเกอร์

(2) มาตรการลดปริมาณน้ำโดยการบริหารจัดการ เช่น ปรับปรุงตารางการให้น้ำและการควบคุมความชื้นในชั้นดิน

(3) มาตรการลดปริมาณน้ำโดยการกสิกรรม (agronomic measures) เช่น การพรวนดินระดับลึกให้ดินมีความชื้นสูงลดความถี่ในการให้น้ำ หรือการใช้ฟางหรือพลาสติกคลุมดินป้องกันการระเหยของน้ำ

(4) ผลที่ได้จากการประหยัดน้ำดังกล่าวต้องไม่นำไปขยายพื้นที่การเพาะปลูกหรือเพิ่มปริมาณการใช้น้ำในภาคส่วนอื่นๆ

9. เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี, 2542. การประเมินศักยภาพของแหล่งน้ำบาดาลและผลกระทบการใช้น้ำบาดาล บริเวณตำบลท่าพระ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น, กรมน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.

Foster, S., 2002. Thailand: Strengthening Capacity in Groundwater Resources Management, GW Mate, The World Bank Global Water Partnership Program, Briefing Note Series No. 1.

Foster, S., Tuinhof, A., Kemper, K., Garduño, H., and Nanni, M., 2006. Characterization of Groundwater Systems key concepts and frequent misconceptions, GW Mate, The World Bank Global Water Partnership Program, Briefing Note Series No. 2.

Misshra, G.C., 1991. “Assessment of Groundwater Recharge” Groundwater Exploration and Assessment, Vol. II, Indian Committee on Hydrology, Department of Earth Sciences, University of Rookee, Rookee, India.

Rushton, K.R., 1987. Vertical Flow in Heavily Exploited Hard Rock and Alluvial Aquifers Department of Civil Engineering, University of Birmingham, U.K.

Sharma, S.K., 1991. “Groundwater Recharge Estimation Methodologies”, Groundwater Exploration and Assessment, Vol. II, Indian Committee on Hydrology, Department of Earth Sciences, University of Rookee, Rookee, India.

Srisuk, K., Nettasana, T., Siripokakit, W., Dhanesvanich. O. and Charuratna, A., 2003. Groundwater Evaluation of the Highly Risky Areas of Salt Water Intrusion Tambol Thapra, Khon Kaen, Northeast Thailand, Paper and Presented to Warter Resources Management for Safe Drinking Water, International Conference at Chiangmai, 25-29 March 2003.

Tuinhof, A., Dumars, C., Foster, S, Kemper, K., Garduño, H., Nanni, M., 2006. Groundwater Resource Management an Introduction to Its Scope and Practice, GW Mate, The World Bank Global Water Partnership Program, Briefing Note Series No. 2.

คู่มือ ทบ ป 3000-2550
การจัดทำแบบจำลองน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์และการประยุกต์ใช้

คู่มือ ทบ ป 3000-2550 เป็นคู่มือการปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล (ป) ของ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (ทบ) กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ตัวเลขชุดแรกมี 4 ตำแหน่ง หมายถึง ลำดับของคู่มือ ตัวเลขชุดที่สอง “2550” หมายถึง ปี พ.ศ. ที่จัดทำเอกสารต้นฉบับของคู่มือ กรณีที่มีการแก้ไขและปรับปรุงคู่มือให้ใส่วงเล็บต่อท้ายและระบุ ปี พ.ศ. ที่แก้ไขปรับปรุง เช่น (แก้ไขปรับปรุง 2555) เป็นต้น โดยมีเครื่องหมาย (ก) เป็นตัวยกกำกับหน้าข้อความที่แก้ไข และมีเครื่องหมาย (ป) เป็นตัวยกกำกับหน้าข้อความที่ปรับปรุงขึ้นใหม่

1. บทนำ

แบบจำลอง (model) เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการประเมินสภาพต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติ แบบจำลองน้ำบาดาล (groundwater model) เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้ประเมินและคำนวณผลการไหลของน้ำบาดาลโดยประมาณ หรือใช้เป็นเครื่องมือจำลองสภาพต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติที่ทำการทดลองและคาดคะเนเหตุการณ์ต่าง ๆ ในปัจจุบันและอนาคต แบบจำลองน้ำบาดาลมี 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) แบบจำลองทางกายภาพใช้ในการจำลองการไหลของน้ำในกรณีต่าง ๆ ซึ่งอาจจะเป็นกล่องที่มีการจำลองชั้นดินและหิน มีการเติมน้ำและสารเคมีโดยการควบคุมตัวแปรทางชลศาสตร์ สามารถตรวจสอบผลได้จากแบบจำลองโดยตรง ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองใช้คำนวณทิศทาง อัตราการไหลของน้ำบาดาล และการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำ โดยนำวิธีการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้คำนวณและวิเคราะห์ระบบน้ำบาดาลแทนแบบจำลองทางกายภาพ ปัจจุบันได้นำคอมพิวเตอร์มาเป็นเครื่องมือร่วมกับวิธีการทางคณิตศาสตร์ในการจำลองปรากฏการณ์ต่างๆ

2. ความสำคัญและการใช้งาน

แบบจำลองน้ำบาดาลอธิบายการไหลน้ำบาดาลและการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำบาดาลโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ที่เกิดจากสมมติฐานบางประการ แบบจำลองการไหลน้ำบาดาลใช้ในการคำนวณหาอัตราและทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลผ่านหินอุ้มน้ำ การจำลองการไหลของน้ำบาดาลอาศัยความเข้าใจลักษณะทางชลศาสตร์และอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่นั้นๆ

การจำลองการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำบาดาล (fate and transport models) เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ในขณะที่มีการเคลื่อนที่ไปกับน้ำบาดาล การจำลองการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำบาดาลนั้น ในขั้นต้นต้องมีการปรับแก้ค่าตัวแปรเพื่อเปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่คำนวณได้กับข้อมูลที่วัดจริงในสนามก่อน ความถูกต้องในการประมาณค่าความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำบาดาลขึ้นอยู่กับข้อมูลสนาม การเปลี่ยนแปลงของมวลสารในน้ำบาดาล แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถประยุกต์ใช้ตามวัตถุประสงค์ของการจำลอง โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

(1) แบบจำลองใช้วิเคราะห์ระบบการไหลในกรณีสมมติในทางทฤษฎี (hypothetical approach) และช่วยในการตรวจสอบแนวทางในการศึกษาของ

สภาพพื้นที่นั้น ๆ (generic model) จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำผลการจำลองไปเปรียบเทียบกับข้อมูลสนาม

(2) แบบจำลองเพื่อใช้ศึกษาระบบโครงร่างของพื้นที่ (interpretive model) แบบจำลองชนิดนี้จะใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผนระบบการเก็บข้อมูล วิเคราะห์ระบบหรือความสัมพันธ์ของข้อมูลต่าง ๆ ของพื้นที่นั้น ๆ แบบจำลองชนิดนี้จึงไม่มีความจำเป็นจะต้องมีการเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลสนาม

(3) แบบจำลองเพื่อใช้คาดคะเนหรือพยากรณ์ (predictive model) การจำลองเพื่อหวังผลในการคาดคะเน เป็นการจำลองที่มีขั้นตอนที่ยุ่งยากและต้องการข้อมูลที่สมบูรณ์ที่สุด เช่น การจำลองการคาดคะเนระดับน้ำ คุณภาพน้ำ ปริมาณน้ำ หรือการแพร่กระจายของสารพิษในน้ำ แบบจำลองชนิดนี้จึงมีความจำเป็นจะต้องมีการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ และเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลสนาม (calibration)

การประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การไหลและการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในน้ำบาดาล ส่วนใหญ่จะมุ่งไปยังแบบจำลองที่ต้องการใช้เป็นเครื่องมือในการพยากรณ์หรือคาดคะเนเหตุการณ์ต่าง ๆ ในอนาคต เพื่อจะนำผลมาออกแบบป้องกันและแก้ไขปัญหาของแหล่งน้ำบาดาลนั้น ๆ ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ต้องการข้อมูลสนามมากที่สุดเท่าที่จะมากได้ พร้อมทั้งผลการติดตามข้อมูลที่ใช้เวลาติดต่อกันหลายปี

3. ทฤษฎีการไหลของน้ำบาดาลและการเคลื่อนที่ของมวลสาร

3.1 กระบวนการหลักที่เกิดขึ้นกับการไหลของน้ำบาดาล

กระบวนการสำคัญที่เกิดขึ้นในขณะที่น้ำบาดาลไหลผ่านช่องว่างในหินที่มีรูพรุน ได้แก่ การไหลของของเหลว (fluid flow) การเคลื่อนที่ของมวลสารที่ละลายในน้ำ (solute transport) การพาของความร้อน (heat transport) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและปริมาตรของหิน (deformation) ซึ่งเป็นกระบวนการหลักทั้ง 4 กระบวนการ วิธีการทางคณิตศาสตร์นำมาประยุกต์ใช้ภายใต้สภาวการณ์ต่างๆ เพื่อแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการหลักนี้ และผลที่ได้จากการใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์นี้คือตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 1 จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คืองานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์งานพัฒนาแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม เช่น การคำนวณการปนเปื้อนของเสีย การเลือกแหล่งทิ้งขยะ การฝังหรือกักเก็บสารพิษใต้ดิน หรือแม้กระทั่งการใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น

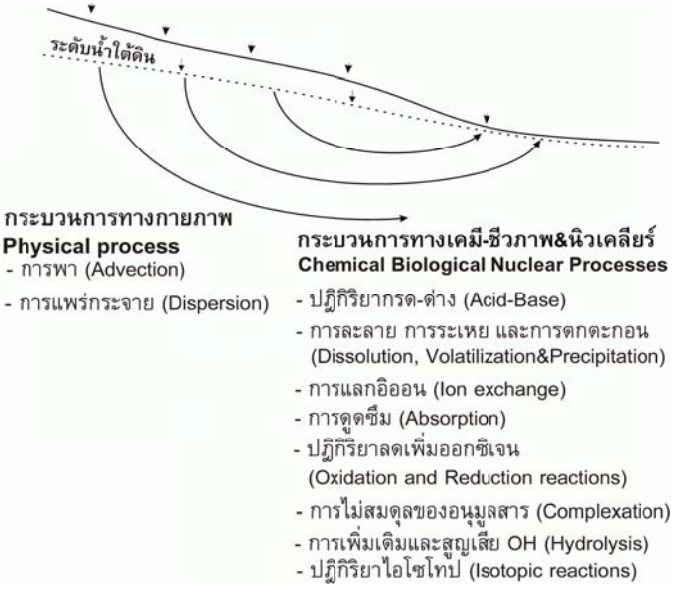
การปนเปื้อนของมวลสารในน้ำบาดาลทำให้เกิดมลภาวะในแหล่งน้ำบาดาล ซึ่งมีความเข้มข้นของสารนั้น ๆ สูงกว่าความเข้มข้นปกติในธรรมชาติที่ไม่มีการปนเปื้อน (background) การแพร่กระจายของมวลสารในน้ำบาดาลถูกพัดพาไปด้วยกระบวนการ 3 กระบวนการ (รูปที่ 1) คือ (1) กระบวนการทางกายภาพ ได้แก่ การพา การแพร่ และการกระจาย (2) กระบวนการทางเคมี ได้แก่ ปฏิกิริยาของสารต่าง ๆ กับน้ำและหินอุ้มน้ำนั้น ๆ เช่น ปฏิกิริยาเคมีความเป็นกรด-ด่าง, การตกตะกอนของสาร การละลาย การดูดซึมบนดินหิน และการแพร่กระจายของสารกัมมันตรังสี (3) กระบวนการทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายโดยจุลชีพ เป็นต้น

การพาเป็นกระบวนการหลักที่ทำให้สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ได้เร็วกว่ากระบวนการอื่นๆ ดังนั้นการศึกษาการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในน้ำบาดาล จะทำการวิเคราะห์ทิศทางและขนาดการไหลของน้ำบาดาลในบริเวณนั้นๆ ให้ถูกต้องก่อนจะทำการศึกษากระบวนการอื่นๆ

ตารางที่ 1 กระบวนการหลักที่เกิดขึ้นกับการไหลที่ของน้ำบาดาล

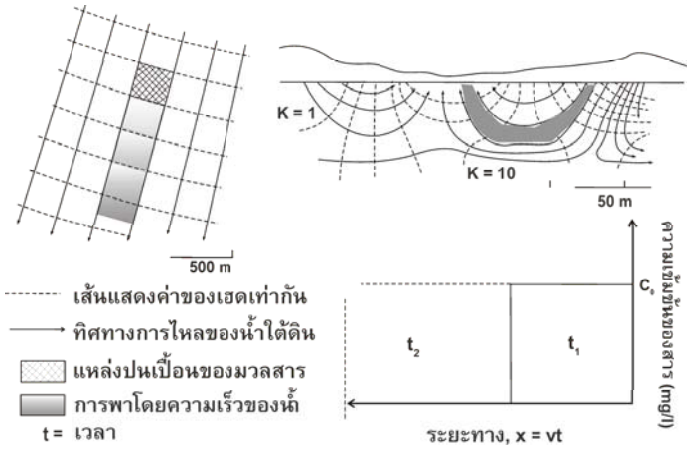
กระบวนการหลัก	ตัวแปรที่ขึ้นกับการไหลของน้ำบาดาล	สถานการณ์
การไหลของของไหล (fluid flow)	เฮดชลศาสตร์หรือระดับพลังงานทางชลศาสตร์ (hydraulic head) ศักย์ของของเหลว (fluid potential) หรือระดับลด (drawdown)	วัตถุตัวกลางมีความพรุนแบบเดียว หรือมีความพรุนหลายแบบ ของไหลชนิดเดียวหรือของไหล หลายชนิด
การพาความร้อน (heat transport)	อุณหภูมิ (temperature) พลังงาน (energy)	คล้ายกับการไหลและมีการพาความร้อน การนำความร้อนและการแผ่รังสี
การเคลื่อนที่ของมวลสาร (solute transport)	ความเข้มข้นของสารละลาย (concentration)	คล้ายกับการไหลและมีการพา (convection) การแพร่ ปฏิกิริยาเคมี
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและปริมาตรของหิน (deformation)	การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (strain) และอัตราการเปลี่ยนแปลง (strain rate)	วัตถุตัวกลางมีความยืดหยุ่น การบิดงอ ความหนืด มีการแตกหัก

(ดัดแปลงจาก Mercer and Faust, 1980)

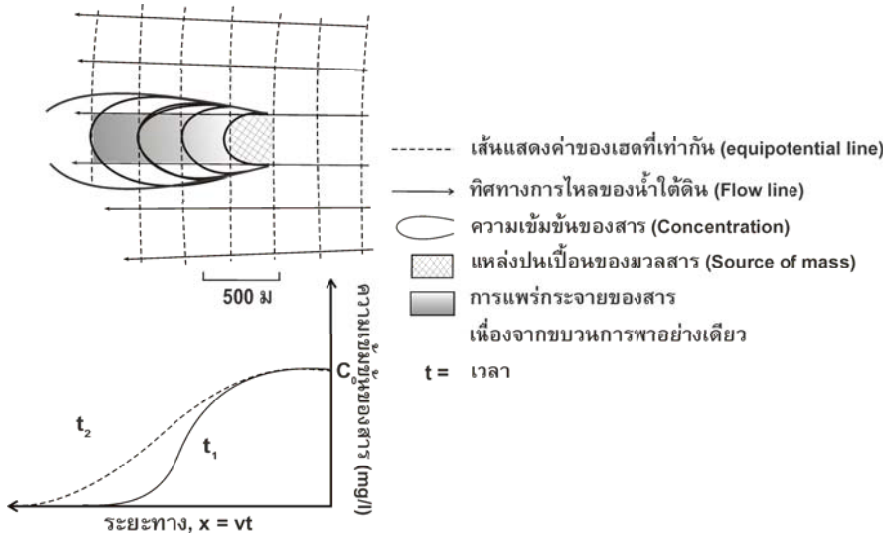


รูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของมวลสารปนเปื้อนในน้ำบาดาล (ดัดแปลงจาก Domenico and Schwartz, 1998)

การแพร่ (diffusion) ของมวลสารในน้ำเกิดจากความแตกต่างในความเข้มข้นของมวลสาร ทำให้สารนั้นเกิดการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การแพร่ของมวลสารจะเป็นกระบวนการสำคัญก็ต่อเมื่อการไหลช้ามาก ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของหินอุ้มน้ำ ทำให้เกิดช่องว่าง (porosity) ในหินอุ้มน้ำมีรอยแตกหรือรูพรุนไม่เท่ากัน จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของหิน (hydraulic conductivity, K) ไม่เท่ากัน ณ จุดต่าง ๆ ดังนั้นน้ำบาดาลจึงไหลในทิศทางต่าง ๆด้วยความเร็วไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการกระจายของมวลสารถือว่าเป็นกระบวนการทางกายภาพร่วมกับการพา (รูปที่ 2 และรูปที่ 3)



รูปที่ 2 การเคลื่อนที่ของมวลสารจากการพาอย่างเดียว (ดัดแปลงจาก Domenico and Schwartz, 1998)



รูปที่ 3 การเคลื่อนที่ของมวลสารที่เกิดจากการพาและการแพร่กระจาย
(ดัดแปลงจาก Domenico and Schwartz, 1998)

มวลสารที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาลจะเกิดปฏิกิริยาเคมีและชีวภาพกับน้ำและหินได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของมวลสารนั้น ๆ มวลสารที่ปนเปื้อนแหล่งน้ำบาดาลสามารถจำแนกออกได้ 2 กลุ่มคือ มวลสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับน้ำและหิน (conservative contaminants) เช่น เกลือ โลหะหนักส่วนใหญ่ และมวลสารที่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในขณะที่เคลื่อนที่ไปกับน้ำบาดาล (non-conservative contaminants) เช่น อินทรีย์สาร (organic compounds) และสารกัมมันตรังสี ปัจจุบันสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดมลพิษและแพร่กระจายในน้ำบาดาลประมาณ 3,500 ชนิด ที่พบในแหล่งทิ้งขยะมูลฝอยในสหรัฐอเมริกาและแคนาดาประมาณ 200,000 แหล่ง (Spitz and Mareno, 1996) ทำให้เกิดความสกปรกต่อแหล่งน้ำบาดาล และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสำรวจและกู้สารพิษเหล่านี้ออกจากน้ำบาดาล แบบจำลองในปัจจุบันสามารถนำมาวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ (ทิศทาง ระยะทาง และความเข้มข้น ณ เวลาต่าง ๆ ของมวลสารต่าง ๆ ในน้ำบาดาลที่เกิดจากกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพได้

3.2 สมการการไหลของน้ำบาดาล

ความเร็วของน้ำบาดาลสามารถคำนวณได้จากกฎของดาร์ซี่และความพรุนของหินอุ้มน้ำที่มีความต่อเนื่อง (effective porosity) ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหิน (hydraulic conductivity, K) และค่าความแตกต่างของเฮดหรือระดับแรงดันของน้ำต่อหน่วยระยะทางหรือ hydraulic gradient ดังนี้

$$v = \frac{K}{n_e} \cdot \frac{\partial h}{\partial l} \qquad (1)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วเฉลี่ยของน้ำในช่องว่าง (seepage velocity) [LT^{-1}]

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ (hydraulic conductivity) [LT^{-1}]

n_e คือ ความพรุนที่ต่อเนื่องในชั้นหิน (effective porosity)

$\frac{\partial h}{\partial l}$ คือ hydraulic gradient (i) ระหว่างจุด 2 จุดที่น้ำไหลผ่าน

สมการหลัก (governing equation) แสดงการไหลของน้ำบาดาลที่นำกฎของดาร์ซี่มาวิเคราะห์ร่วมกับสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านชั้นหินอุ้มน้ำแบบ 3 มิติ

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial h}{\partial z}) \pm W = S \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (2)$$

เมื่อ K_x, K_y, K_z คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านหรือ hydraulic conductivity ในแนว *x, y* และ *z* [LT^{-1}]

h คือ ค่าเฮดหรือระดับแรงดันของน้ำ (hydraulic head) [L]

W คือ อัตราการสูบหรือสูญเสียน้ำ (-) หรือ sink การเพิ่มเติมน้ำ (+) ต่อระบบหรือ source [T^{-1}]

S_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ (specific storage) ในแนวแกน x, y และ z [LT^{-1}]

t คือ เวลา [T]

$\frac{\partial h}{\partial t}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของ head ต่อเวลา [LT^{-1}]

3.3 สมการการเคลื่อนที่ของมวลสาร

สมการการเคลื่อนที่ของมวลสาร (mass transport equation) ในแหล่งน้ำบาดาล 3 มิติ (กว้าง ยาว และลึก) ขึ้นอยู่กับการจำลองของการไหลของน้ำเป็นหลักร่วมกับลักษณะการแพร่และการกระจายของ

สารนั้น ๆ ดังนั้นอัตราความเข้มข้นของมวลสารที่เคลื่อนที่ในเวลาต่างๆ ($\partial C/\partial t$) สามารถคำนวณได้จากสมการอนุพันธ์เชิงซ้อน (partial differential equation) (Zheng, 1996) ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_i}(V_i C) + \frac{q_s}{n}C_s + \sum_{k=1}^{N} R_k \quad (3)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของมวลสารที่ละลายในน้ำ [ML^{-3}]

T คือ เวลา [T]

x_i คือ ระยะทางที่มวลสารเคลื่อนที่ไปในแนวแกน x [L]

D_{ij} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (hydro-dynamic dispersion coefficient) [L^2T^{-1}]

V_i คือ ความเร็วจริงเชิงเส้น (linear pore water velocity) [LT^{-1}]

q_s คือ อัตราของน้ำที่ไหลเข้า (sources, +) หรือไหลออก (sinks,-) ผ่านบ่อบาดาลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของชั้นหินอุ้มน้ำ [T^{-1}]

n คือ ความพรุนของวัตถุตัวกลาง

C_s คือ ความเข้มข้นของมวลสาร ณ จุดที่เข้าสู่แหล่งน้ำ [ML^{-3}]

R_k คือ มวลสารที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในขณะที่มีการเคลื่อนที่ [$L^{-3}T^{-1}$]

4. ประเภทของแบบจำลอง

การแก้สมการการไหลของน้ำบาดาลและการเคลื่อนที่มวลสารสามารถทำได้หลายวิธีโดยใช้แบบจำลองประเภทต่างๆ แบบจำลองบางประเภทสามารถหาผลเฉลยตรง (exact solutions) ที่บ่งบอกถึงการไหลภายใต้สภาวะการเคลื่อนที่อย่างง่ายๆ เช่น แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (analytical models) ในขณะที่แบบจำลองอื่นๆ เช่น การจำลองเชิงตัวเลข (numerical analysis) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีสภาวะขอบเขตการไหลมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนที่แตกต่างจากวิธีเชิงวิเคราะห์

แบบจำลองแต่ละประเภทใช้จำลองหนึ่งกระบวนการที่เป็นกระบวนการหลักหรือมากกว่านั้น แต่ไม่ใช่จำลองทั้งกระบวนการไหลและการเคลื่อนที่ของมวลสารทั้งระบบ ตัวอย่างเช่น แบบจำลองการติดตามมวลสารและทิศทาง เช่น MODPATH ที่ใช้ในการจำลองการพาของสารปนเปื้อน แต่ไม่รวมกระบวนการอื่น ๆ เข้าไว้ด้วยในแบบจำลองประเภทนี้

ในการเลือกชนิดของแบบจำลองให้เหมาะสมต่อพื้นที่ศึกษาจำเป็นต้องพิจารณาสมการที่ใช้ในแบบจำลองให้เหมาะสำหรับกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ศึกษา แบบจำลองแต่ละชนิดไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองกายภาพอย่างง่ายหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนจะเกิดประโยชน์สูงสุดเมื่อประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม

4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงวิเคราะห์

แบบจำลองประเภทเชิงวิเคราะห์ (analytical models) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการหาค่าคำตอบที่แท้จริง (exact solutions) จำลองการไหลของน้ำในกรณีต่าง ๆ ที่บ่งบอกถึงการไหลและสภาวะการเคลื่อนที่ไม่ซับซ้อน สมการหลักเป็นสมการการไหลของน้ำบาดาลหรือการเคลื่อนที่มวลสารแบบ 1 มิติ 2 มิติ หรือ 3 มิติ ปัจจุบันได้นำคอมพิวเตอร์มาเป็นเครื่องมือร่วมกับวิธีการเชิงตัวเลขในการจำลองปรากฏการณ์ต่าง ๆ เพราะสภาพธรรมชาติมีความซับซ้อน ยากที่จะใช้สมการอย่างง่ายในการแก้ปัญหาโดยเฉพาะอย่างยิ่งสมการอย่างง่ายสามารถจำลองการไหลของน้ำบาดาลมิติเดียวและจำลองการเคลื่อนตัวมวลสารในน้ำใน 1 มิติ หรือ 2 มิติ

สมมุติฐานอื่นๆในสมการการไหลและการเคลื่อนตัวของมวลสารอย่างง่ายในวิธีเชิงวิเคราะห์

รวมถึง การไหลของน้ำบาดาลแบบทิศทางเดียวและราบเรียบ ลักษณะสัณฐานของหินอุ้มน้ำมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและมีทิศทางเดียวกัน คุณสมบัติทางชลศาสตร์และคุณสมบัติทางปฏิกิริยาเคมีมีความสม่ำเสมอ นอกจากนั้นแล้วแบบจำลองคณิตศาสตร์ประเภทวิเคราะห์ สามารถจำลองการไหลและเคลื่อนตัวของมวลสารในหนึ่งมิติและในสภาพคงที่ (steady-state)

การแก้สมการการไหลของน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์โดยวิธีการเชิงวิเคราะห์ สามารถทำได้หลายวิธี บางปัญหาสามารถใช้วิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธีร่วมกัน เช่น direct integration, ordinary differential equation (ODE), separation of variables, Laplace transform, fourier transform, Schwarz-Christoffel's transformation หรือวิธีอื่นๆ รายละเอียดการแก้สมการเหล่านี้สามารถอ้างอิงได้จาก Bear and Verruijt (1987) Zheng and Bennett (2002) de Marsily (1986)

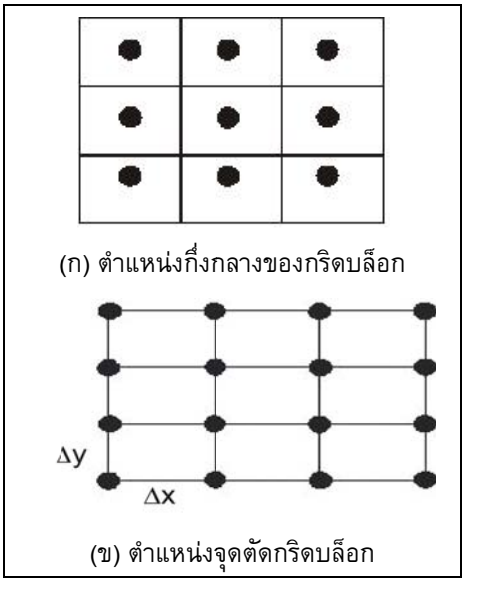
เนื่องจากสมมุติฐานที่ตั้งขึ้นทำให้การวิเคราะห์ในแบบจำลองประเภทนี้ยากที่จะจำลองการเปลี่ยนแปลงของสภาพการณ์ตามเวลาหรือสถานที่ที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติ เช่น การเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำบาดาล การเปลี่ยนแปลงทางชลศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้น ขอบเขตทางเคมี หรือขอบเขตของพื้นที่และประเภทของหิน

ดังนั้นแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (analytical models) เหมาะสำหรับประเมินพื้นที่เบื้องต้นที่ไม่ต้องการความถูกต้องแม่นยำในระดับสูง ช่วยในการออกแบบการเก็บรวบรวมข้อมูลในการสำรวจภาคสนามใช้เพื่อการทดสอบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ประเภทเชิงตัวเลข

การจำลองเชิงตัวเลข คือการเปลี่ยนสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิตเชิงเส้นโดยตรง แล้วจึงแก้สมการพีชคณิตจึงจะได้ผลเฉลย มีอยู่หลายวิธี เช่น finite-difference method, finite-element method, boundary-element method, hybrid numerical-analytical method เป็นต้น

การแก้สมการการไหลของน้ำบาดาลโดยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์ (finite difference method) ทำการแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม เช่น กรณีการคำนวณสองมิติ การแบ่งกริดสามารถทำได้สองวิธี คือ mesh centered และ block centered ดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นทำการประมาณสมการหลักพร้อมกับประมาณขอบเขตทางอุทกธรณีโดยใช้ Taylor series expansion ผลลัพธ์คือชุดสมการเส้นตรงที่มีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปรซึ่งในที่นี้คือเฮดหรือระดับแรงดันของน้ำบาดาล



(ก) ตำแหน่งกึ่งกลางของกริดบล็อก

(ข) ตำแหน่งจุดตัดกริดบล็อก

รูปที่ 4 การแบ่งกริดของค่าระดับแรงดันของน้ำ

4.3 การแก้ชุดสมการเส้นตรง

4.3.1 วิธีทางตรง แก้สมการโดยดีเทอร์มิแนนท์ (determinants) โดยวิธี Gaussian elimination หรือ เมตริกส่วนกลับ (matrix inversion, $X=BA^{-1}$) การแก้ปัญหาโดยวิธีทางตรง มีข้อดี คือ ขั้นตอนลำดับไม่ยุ่งยาก ไม่จำเป็นต้องอนุมานค่าเบื้องต้น ไม่จำเป็นต้องมีค่ากำหนดซ้ำ เหมาะสำหรับการไหลแบบสภาวะคงที่ (steady state) และข้อเสีย คือ ต้องใช้ความจุและความจำในเครื่องคอมพิวเตอร์มาก

4.3.2 วิธีการทำซ้ำ (iterative methods) คือ วิธีการแก้ชุดสมการเชิงเส้น โดยการกำหนดค่าเริ่มต้น แล้วทำการคำนวณซ้ำจนกว่าค่าผิดพลาดจะมีค่าน้อยพอจะยอมรับได้ เช่น Jacobi method และ Gauss Seidel method และวิธีประยุกต์ เช่น alternating direction implicit method (ADI), successive overrelaxation (SOR) และ iterative alternating direction method (IADI) มีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูง ในกรณีที่สมการมีความยุ่งยากและใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งเหมาะสำหรับการไหลแบบสภาวะไม่คงที่หรือ transient state และมีข้อเสีย คือ จำเป็นต้องอนุมานค่าเริ่มต้น รายละเอียดการแก้สมการเหล่านี้โดยวิธีเชิงตัวเลขสามารถอ้างอิงได้จาก Bear and Verruijt (1987) Zheng and Bennett (2002) และ De Marsily (1986)

5. ขั้นตอนการจำลองน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลสนามและระบบอุทกวิทยาเพื่อตรวจสอบการแพร่ กระจายของสารปนเปื้อนในน้ำบาดาล เป็นวิธีการประมวลผลที่รวดเร็วและได้ผลที่ดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนและความแม่นยำของข้อมูลสนามซึ่งใช้ในการปรับแบบจำลอง การเตรียมแผนงานจำลองมีขั้นตอน (รูปที่ 5) ดังนี้

5.1 กำหนดวัตถุประสงค์ของแบบจำลอง

การกำหนดวัตถุประสงค์ของแบบจำลอง (define purpose) จะแตกต่างกันแล้วแต่กรณี เช่น เพื่อใช้แบบจำลองในการวางแผนงาน คำนวณทิศทางการไหล ปริมาณการไหล หรือทำนายผล กระทบ ดังนั้นขั้นตอนของการจำลองไม่จำเป็นต้องครบวงจรทั้งหมด ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานเป็นหลัก

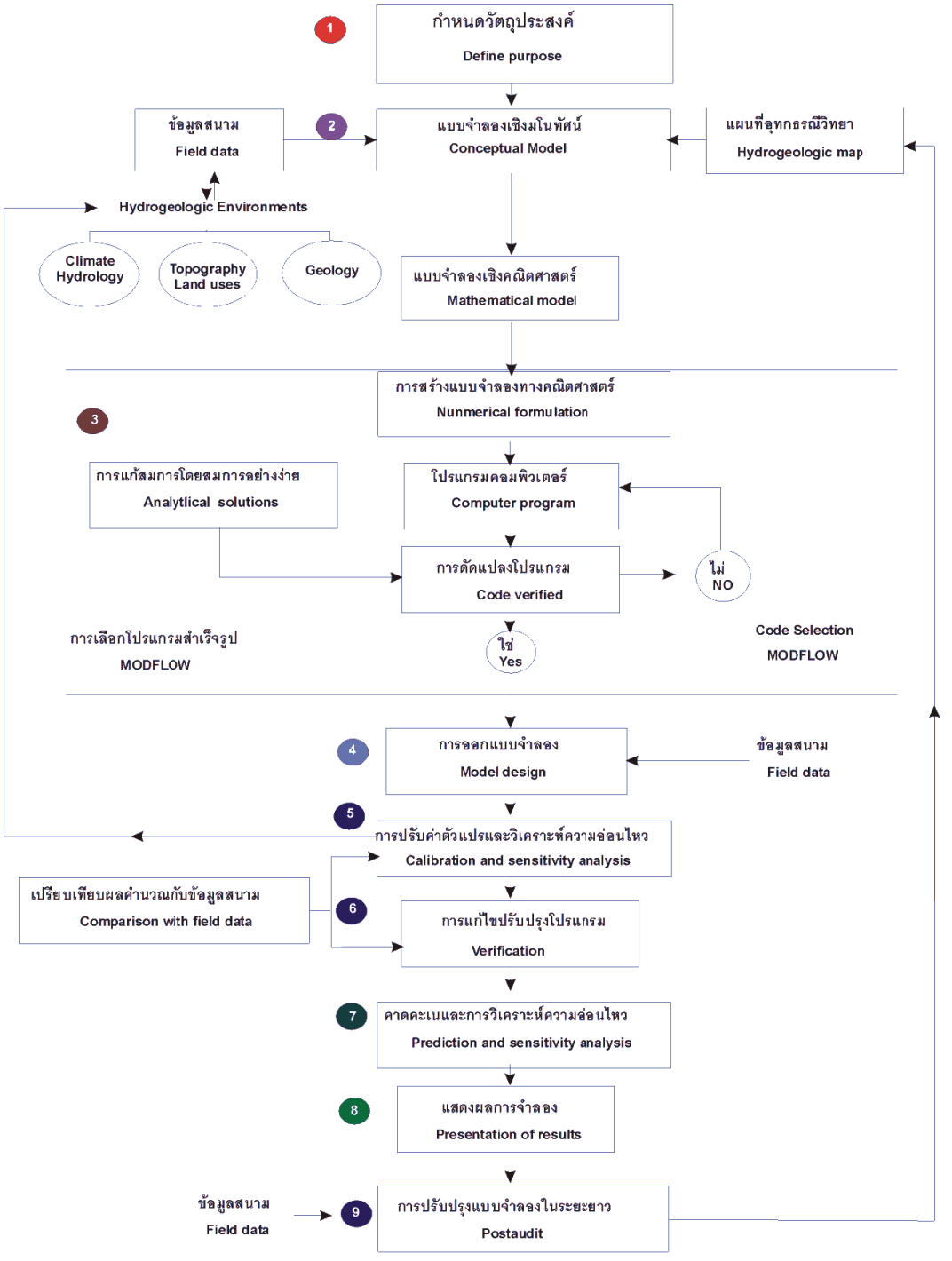
5.2 การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์

การสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์(conceptual model) เป็นการรวบรวมข้อมูลทางอุทกธรณีวิทยาร่วมกับข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ โดยใช้ข้อมูลเหล่านี้สร้างกรอบแนวคิดโดยรวม ทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา แสดงผลในรูปแผนที่ หรือรูปตัดที่แสดงความ สัมพันธ์ของข้อมูลเหล่านี้

ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้เวลาและงบประมาณสูง โดยจะเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบันหรืองานเก่าที่ได้มีการบันทึก ถ้าข้อมูลไม่เพียงพอควรวางแผนการสำรวจภาคสนามและศึกษาเพิ่มเติม

5.2.1 ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา

ความเข้าใจสภาพอุทกธรณีวิทยา(hydrogeologic characterization) ของพื้นที่ศึกษามีความสำคัญอย่างยิ่งในการจำลองการไหลและการเคลื่อนที่มวลสารในน้ำบาดาล เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในงานด้านการฟื้นฟูสภาพแวดล้อม (remedial action) ดังนั้นการศึกษาลักษณะพื้นที่ศึกษา (site characterization) จึงมีความจำเป็นต้องมีข้อมูลอย่างสมบูรณ์หรือมากที่สุด ข้อมูลลักษณะพื้นที่ศึกษานี้ไม่ใช่แค่เพียงการเก็บข้อมูลในสนามเพื่อการประเมินเบื้องต้น ควรมีการเจาะบ่อติดตามเพิ่มเติม (monitoring well) เก็บน้ำตัวอย่างให้มีจำนวนเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ในห้อง ปฏิบัติการและในสนาม



รูปที่ 5 ขั้นตอนการจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการเคลื่อนที่ของมวลสาร
(ดัดแปลงจาก Anderson and Woessner, 1992 และ เกรียงศักดิ์ ศรีสุข, 2542)

ถ้าข้อมูลลักษณะพื้นที่ศึกษาที่ได้ไม่ถูกต้องและไม่เหมาะสม การเลือกประเภทของแบบจำลองหรือความเชื่อมั่นผลการจำลองจะคลาดเคลื่อนมาก ข้อมูลอุทกธรณีและธรณีเคมีที่ควรมีในการอธิบายลักษณะพื้นที่ศึกษา มีดังนี้

(1) ข้อมูลจากแผนที่ธรณีวิทยาและภาพตัดขวางของพื้นที่

(2) ข้อมูลภูมิประเทศ (รวมถึงระดับน้ำผิวดิน)

(3) แหล่งน้ำผิวดินและข้อมูลการสูญเสียน้ำหรือให้น้ำ (stream-discharge หรือ base flow) ของแม่น้ำหรือแหล่งน้ำนั้น ๆ

(4) ข้อมูลเฮดหรือระดับแรงดันของน้ำ (hydraulic head)

(5) ข้อมูลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหิน (hydraulic conductivity) จากชั้นหินอุ้มน้ำ จากการสูบทดสอบ

(6) ตำแหน่งและการประมาณอัตราการเติมน้ำต่อระบบ (source) หรือการสูบหรือสูญเสียน้ำ (sink) ของน้ำบาดาล

(7) ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับสารปนเปื้อน

(8) ขนาดของการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในเบื้องต้น

(9) ตำแหน่ง ประวัติ และอัตราการเติมสารปนเปื้อนหรืออัตราการกำจัดสารปนเปื้อนในพื้นที่ศึกษา

(10) ทิศทางและอัตราการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน

(11) สัญญาณบ่งชี้ถึงตัวรับสารปนเปื้อน ณ ตำแหน่งท้ายน้ำ

(12) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอนดิน

(13) ตัวแปรทางธรณีเคมีที่จำเป็นจากภาคสนาม (เช่น ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ค่า Eh ค่า pH)

(14) ตัวแปรบ่งชี้ (indicator) ทางธรณีเคมีอื่นๆ ที่จำเป็น

ข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่จำเป็นต่อแบบจำลองการเคลื่อนที่มวลสารและควรมีการนำเสนอในรูปแบบของแผนที่ ตาราง กราฟ ในราย งานการพัฒนาแบบจำลอง

5.2.2 การจัดทำแบบจำลองเชิงมโนทัศน์

หลักการในการพัฒนาแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (model conceptualization) ประกอบไปด้วยกระบวนการอธิบายลักษณะของพื้นที่ศึกษาอย่างเป็นระบบร่วมกับการจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการเคลื่อนที่มวลสารในน้ำ แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ช่วยในการพิจารณาประเภทแบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภายใต้สภาพการณ์ต่างๆที่เหมาะสมหรือคำถามพื้นฐานต่างๆ เช่น ข้อมูลสภาพลักษณะพื้นที่ศึกษามีเพียงพอหรือยัง

(1) การไหลของน้ำบาดาลมีทิศทางการไหลอย่างไร

(2) การไหลของน้ำบาดาลหรือการเคลื่อน ที่มวลสารในน้ำสามารถจำลองในหนึ่งมิติหรือสองมิติหรือสามมิติ

(3) ชั้นหินอุ้มน้ำมีมากกว่าหนึ่งชั้นหรือไม่ และการไหลผ่านชั้นกั้นน้ำ มีความสำคัญหรือไม่

(4) มีการเติมน้ำในชั้นอุ้มน้ำซึ่งอาจเกิดจากน้ำฝน แม่น้ำ บ่อ ทะเลสาบหรือการซึมจากบ่อหรือไม่

(5) น้ำบาดาลไหลออกจากชั้นหินอุ้มน้ำโดยซึมออก (seepage) ไปยัง แม่น้ำหรือทะเลสาบหรือสูบออกจากบ่อ หรือไม่

(6) ลักษณะทางอุทกธรณีของชั้นหินอุ้มน้ำที่ปรากฏมีความเป็นเนื้อเดียวกันหรือข้อมูลทางธรณี-วิทยาแสดงความหลากหลายในพื้นที่นั้นๆ ใช่หรือไม่

(7) มีการกำหนดขอบเขตของพื้นที่และประเภทของหินในแบบจำลองหรือไม่และขอบเขตที่กำหนดมีหลักพื้นฐานทางอุทกธรณีหรือธรณีเคมีไหม

(8) การไหลของน้ำบาดาลหรือสภาวะแหล่งของการปนเปื้อนยังคงสภาพคงที่ไม่เปลี่ยน-แปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

(9) มีตัวรับสารปนเปื้อนอยู่ท้ายน้ำจากสิ่งปนเปื้อนใช่ไหม

(10) มีปฏิกิริยาทางธรณีเคมีเกิดขึ้นในน้ำบาดาลใช่หรือไม่ และสามารถเข้าใจกระบวนการที่เกิดขึ้นหรือไม่

(11) ข้อซักถามอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับสภาวะเฉพาะของพื้นที่ศึกษา

5.3 การคัดเลือกซอฟต์แวร์แบบจำลอง

หลังจากการบรรยายลักษณะอุทกธรณีของพื้นที่ศึกษาอย่างครบถ้วนสมบูรณ์ และมีการพัฒนาของแบบจำลองเชิงมโนทัศน์แล้ว ทำการคัดเลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยที่แบบจำลองควรจะมีความสามารถในการจำลองพื้นที่นั้นๆ ขั้นตอนในการเลือกแบบจำลองให้เหมาะสมทำได้ดังนี้

(1) แบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงวิเคราะห์ควรใช้ในกรณีดังต่อไปนี้

(1.1) ข้อมูลสนามแสดงการไหลน้ำบาดาลหรือกระบวนการเคลื่อนที่ของสิ่งปนเปื้อนเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน

(1.2) การประเมินสภาวะทางอุทกธรณีเบื้องต้น หรือการประเมินวิธีการต่างๆ ในการฟื้นฟูจากการปนเปื้อนเบื้องต้น

(2) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงตัวเลขควรใช้ในกรณีต่อไปนี้

(2.1) ข้อมูลสนามแสดงการไหลน้ำบาดาล หรือกระบวนการเคลื่อนที่ของสิ่งปนเปื้อนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน

(2.2) ความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (non-homogenuity) และความไม่เท่ากันในทิศทางต่างๆ (anisotropy) ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

การไหลของน้ำบาดาลหรือแบบจำลองการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำบาดาลแบบหนึ่งมิติควรใช้ในกรณีการประเมินเบื้องต้น โดยที่ยังไม่ทราบถึงสภาพธรรมชาติที่แท้จริง เช่น ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันและทิศทางเดียวกันของหินอุ้มน้ำ พื้นที่ที่มีตัวรับสารปนเปื้อน อยู่ในบริเวณใกล้ๆ ในทิศทางท้ายน้ำของแหล่งกำเนิดสิ่งปนเปื้อน

แบบจำลองสองมิติควรใช้ในกรณีต่อไปนี้ เมื่อมีการเติมน้ำต่อระบบ (source) หรือการสูบหรือสูญเสียน้ำบาดาล (sink) จากที่ต่างๆและพื้นที่ที่เห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีการไหลน้ำบาดาลในสองมิติ (เช่น การไหลเข้าของน้ำจากทุกทิศทางเข้ามาที่บ่อ) หรือชั้นหินอุ้มน้ำชั้นเดียวที่มีการไหลในแนวดิ่งหรือมีค่าความแตกต่างของการปนเปื้อนน้อยมาก

- คุณสมบัติของแรงดันน้ำแสดงความแตก ต่างหลากหลายในพื้นที่ของชั้นหินอุ้มน้ำ
- การเคลื่อนที่ของมวลสารมีการแพร่กระจายเกิดขึ้นทั้งในแนวราบ (lateral) หรือแนวตั้ง (vertical)

แบบจำลองการไหลและการเคลื่อนที่มวลสารในสามมิติควรใช้ในกรณีต่อไปนี้

- มีข้อมูลสภาพอุทกธรณีของพื้นที่ที่แท้จริงอย่างแน่นอน
- มีชั้นหินอุ้มน้ำมากกว่าหนึ่งชั้น
- กระบวนการไหลแนวดิ่งของน้ำบาดาลหรือการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของมวลสารปนเปื้อนมีความสำคัญ

เหตุผลที่ใช้ในการคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมควรรวบรวมไว้ในเอกสารรายงานแบบจำลองน้ำบาดาลเพื่อความน่าเชื่อถือและเป็นแบบอย่าง โดยที่การเลือกโปรแกรมสำหรับพื้นที่ศึกษานั้นเป็นความรับผิดชอบของผู้ใช้แบบจำลอง โปรแกรมแบบจำลองที่เหมาะสมนั้นควรได้รับการทดสอบ การตรวจสอบยืนยันความถูกต้องและบันทึกไว้

ในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปมากมาย ที่มีการทดสอบหรือแก้ไขจากการเปรียบเทียบผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ และในสนามจนเป็นที่เชื่อถือได้แล้ว ประกอบกับการมีโปรแกรมที่ใช้ป้อนข้อมูล (pre-processing) และโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผล (post-processing) ที่สะดวกในการใช้งาน ดังนั้นการเลือกโปรแกรมจึงควรพิจารณาวัตถุประสงค์ของงาน ระดับความน่าเชื่อถือของโปรแกรม ความสะดวกในการใช้งาน และราคาของโปรแกรมเป็นหลัก แบบจำลองในตระกูล MODFLOW (Modular-Three-Dimensional Finite Difference Ground- water Flow Model) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่เขียนโดย McDonald และ Harbaugh US Geological Survey ในปี 1988 มีการพัฒนาออกมาสู่ตลาดหลายชุดและต่อมาในปี 1998 Guigure และ Franz แห่ง Waterloo Hydro-geologic Inc. ได้พัฒนาโปรแกรม Version 2.1 ซึ่งมีโปรแกรมอำนวยความสะดวกในการป้อนข้อมูล (preprocessing) และแสดงผล (postprocessing) เพื่อให้สะดวกและง่ายในการใช้งาน คือ Visual MODFLOW ซึ่งใช้เป็นโปรแกรม หลักในการคำนวณการไหลของน้ำบาดาลร่วมกับระบบอุทกวิทยา นอกจากโปรแกรม MODFLOW ที่ใช้ในการคำนวณความเร็วของน้ำแล้วยังมีโปรแกรม post processing ที่ใช้แสดงผลทิศทางการไหลในแนวหลักของการจำลองแบบระดับน้ำคงที่ (steady state simulation) ซึ่งจะมีประโยชน์ในการศึกษาการแพร่กระจายของสิ่งปนเปื้อนในน้ำบาดาล ได้แก่ โปรแกรม MODPATH ซึ่งรวมอยู่ใน Visual MODFLOW นอกจากนั้นโปรแกรม Visual MODFLOW ยังได้นำเอาโปรแกรมการวิเคราะห์และคำนวณการแพร่กระจายของมวลสารและปฏิกิริยาเคมีของมวลสารบางชนิดเข้ามาผนวกด้วย เช่น MT3D (Mass Transport Three-dimension Model, Zheng, 1996)

การออกแบบแบบจำลอง (model design) เมื่อสร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์และเลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว ข้อมูลสภาพทางกายภาพและอุทกวิทยาจะถูกแปลงเข้าสู่แบบจำลอง โดยการแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็นหน่วยเล็ก ๆ ขึ้นอยู่กับวิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลขที่เลือกใช้ว่าเป็นวิธี finite difference หรือวิธี finite element และ เลือกขนาดของขั้นเวลาของการคำนวณ (time step) และเงื่อนไขสภาพขอบเขตของแบบจำลอง โดยมีหลักดังนี้

5.4 ขนาดของกริด

จำนวนชั้น (layers) ขนาดของกริดในแบบจำลองขึ้นอยู่กับข้อมูลที่มีอยู่ และวัตถุประสงค์ของการจำลองนั้น ๆ เช่น การจำลองเพื่อวางแผนการจัดการน้ำบาดาลในระดับภูมิภาค พื้นที่ขนาด 500 ตร.กม. อาจเลือกใช้ขนาดของกริดเท่ากับ 1 ตร.กม. ได้เพราะจะให้ผลการคำนวณเชื่อถือได้ในระดับวางแผน แต่ในการจำลองเพื่อคำนวณการไหลระหว่างบ่อน้ำในพื้นที่ที่มีบ่อหนาแน่น ควรใช้ขนาดของกริดเล็กลงเป็น 2 ถึง 3 ตร.ม.แทนจึงจะได้ผลการจำลองที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยที่ความกว้างของกริดที่ติดต่อกันไม่ควรต่างกันเกิน 1.5 เท่าของกริดข้างเคียง เพื่อให้ผลการคำนวณที่ดี (Domenico and Schwartz, 1998) ในกรณีที่ใช้กริดขนาดเล็กเกินความจำเป็นกลับทำให้เกิดผลเสียแทนจากการปรับเทียบตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลอง เวลาที่ใช้ในการคำนวณแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับจำนวนกริดของแบบจำลองในการคำนวณนั่นเอง ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ กริดที่มีขนาดเหมาะสม

กับลักษณะของงานและสภาพทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ เพื่อความถูกต้องของผลการจำลอง และประหยัดเวลา

5.4.1 เงื่อนไขของสภาพขอบเขตของแบบจำลอง คือ สภาพขอบเขตทางอุทกธรณีวิทยาที่พื้นที่ศึกษาได้รับผลกระทบจากสภาพภายนอก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ (mathematical condition) ให้ถูกต้องกับเงื่อนไขสภาพอุทกธรณีวิทยาที่แท้จริง เงื่อนไขสภาพขอบเขตที่มีการใช้ในแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาลประกอบด้วย มี 3 แบบ คือ

แบบที่ 1 Dirichlet condition เป็นเงื่อนไขสภาพขอบเขตที่ทราบหรือกำหนดเฮดหรือระดับแรงดันของน้ำ (specified head boundaries) เช่น ทะเลสาบ แม่น้ำ น้ำพุ เฮดในบ่อบาดาลที่สามารถวัดได้ และพื้นผิวที่น้ำซึม (seepage faces) เงื่อนไขขอบเขตประเภทนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อผลแบบจำลองมาก

แบบที่ 2 Neumann condition เป็นเงื่อนไขสภาพขอบเขตที่ทราบหรือกำหนดอัตราการไหล (specified flow boundaries) เช่น ขอบทึบน้ำ สันปันน้ำบาดาล แนวการไหล การซึมผ่านผิวดิน การคายระเหย จุดสูบน้ำ และจุดเติมน้ำ

แบบที่ 3 Cauchy or mixed เป็นเงื่อนไขสภาพขอบเขตแบบกึ่งทึบน้ำ หรือแบบที่อัตราการไหลขึ้นอยู่กับแรงดันน้ำ (head depen-dent flow boundaries) เหมาะที่จะใช้กับชั้นหินอุ้มน้ำแบบรั่วซึม หรือขอบเขตบริเวณที่ใกล้ลำน้ำที่มีระดับน้ำไม่คงที่ เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันน้ำ

ในกรณีที่แอ่งมีความลึกมาก (มากกว่า 3,000 ม.) การเลือกใช้ขอบเขตที่ด้านล่างของแบบจำลอง จำเป็นต้องเลือกบริเวณที่ทราบสภาพการไหล และพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการจำลอง เช่น กรณีที่เป็นชั้นหินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าชั้นหินอุ้มน้ำหลักประมาณ 10 เท่า จากข้อมูลหลุมเจาะ (lithologic log) หรือ จากลักษณะทางโครงสร้างของแอ่ง (structural characteristics) อาจกำหนดให้เป็นขอบเขตด้านล่างที่ไม่มีการไหลได้ แต่ในกรณีที่ไม่มีชั้นหินที่มีคุณสมบัติข้างต้น Boonstra and De Ridder (1981) แนะนำให้ใช้ค่าประมาณจากระยะ 1/4 ถึง 1/8 ของ ระยะห่างเฉลี่ยของแม่น้ำสายหลักที่ระบายน้ำออกจากพื้นที่แทน

5.4.2 ขนาดของขั้นเวลา (time step) ต้องเลือกให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของงานและโปรแกรมที่ใช้ ขนาดของขั้นเวลาที่ใหญ่เกินไปจะทำให้ผลการคำนวณผิดพลาดมาก และขนาดของขั้นเวลาที่เล็กเกินไปจะทำให้เปลืองเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยไม่จำเป็น De Marsily (1986) อธิบายว่าขนาดของขั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่ดีที่สุดคือขนาดของเวลาที่นานที่สุดที่ยอมให้ใช้ในการแก้สมการนั้น ๆ บางครั้งเรียกว่า critical time step (Δt_C) โดยทั่วไปการกำหนดขนาดของขั้นเวลาที่เหมาะสมนี้ สามารถประมาณได้จากสมการ 4)

$$\Delta t_C = S^*a^2/4T \qquad (4)$$

เมื่อ a คือ ค่าขนาดของกริดเซลล์

($\Delta x = \Delta y = a$) [L]

S คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการเก็บกัก [-] และ

T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ [L^2T^{-1}]

สมการ (4) ใช้กับกรณีที่กริดทั้งสองด้านมีขนาดเท่ากันและตัวกลางเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ถ้าขนาดของกริดต่างกันให้ใช้ตัวที่น้อยกว่า

5.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลสนาม การปรับค่าตัวแปร และการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

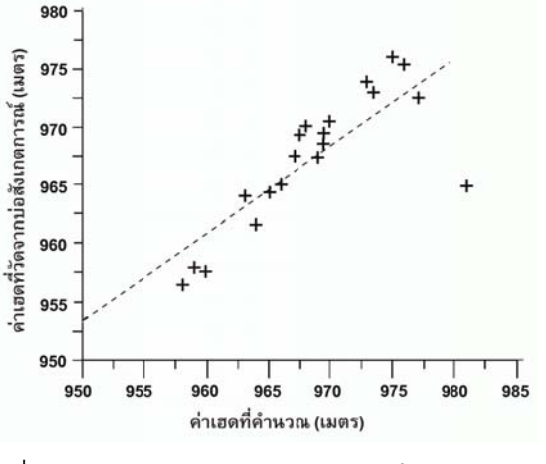
ในการจำลองแต่ละขั้นตอน ข้อมูลหรือพารามิเตอร์บางชนิดที่ป้อนเข้าอาจยังมีความคลาดเคลื่อน ผลการจำลองที่ได้จึงต้องนำไปเปรียบเทียบ(calibration) กับข้อมูลในสนาม ณ เวลา

นั้น ๆ เมื่อผลการจำลองไม่ตรงกับค่าจริงในสนามควรมีการปรับ- เปลี่ยนค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าแน่นอน เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และค่าสัมประสิทธิ์ของการกักเก็บ ปริมาณการเพิ่มเติมน้ำบาดาล และสภาพขอบเขตของแบบจำลองที่เห็นว่าเหมาะสมกว่า เพื่อให้ผลการจำลองที่ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลในสนาม การปรับแก้ข้อมูลมีความจำเป็นต้องเข้าใจสภาพอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่เป็นอย่างดี และมีการปรับค่าพารามิเตอร์โดยวิธีลองผิดลองถูกจนกระทั่งทราบขอบเขตและช่วงค่าของตัวแปรต่าง ๆ และหากผลการจำลองมีความแตกต่างของข้อมูลสนามมาก ควรทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลสนามอีกครั้ง หลังจากนั้นจึงเริ่มการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรที่มีความไม่แน่นอน

การปรับค่าตัวแปรของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลสนาม เป็นการปรับค่าแบบจำลองให้มีความใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง ขั้นตอนนี้เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อจำลองสภาพพื้นที่ได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง ความเข้าใจสภาพอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่อย่างเหมาะสมอาจส่งผลให้การปรับค่าของแบบจำลองไม่ใกล้เคียงกับสภาพจริงในสนาม กระบวนการปรับค่าตัวแปรนั้นเกี่ยวข้องกับทั้งการไหลน้ำบาดาลแบบสภาวะคงที่ (steady-state) และการไหลแบบสภาวะไม่คงที่ (transient state) การจำลองการไหลแบบสภาวะไม่คงที่ (transient state) จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของน้ำ หรือความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในสนามได้ (เช่น การสูบทดสอบหรือการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในน้ำ) การจำลองประเภทนี้จำเป็นต้องมีการจำกัดตัวแปรที่ปรับแก้ให้น้อยที่สุดเนื่องจากตัวแปรต่าง ๆที่ใช้ในแบบจำลองมีมาก และบางครั้งผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าคล้ายกับผลที่ได้จากการจำลองการไหลน้ำบาดาลแบบสภาวะคงที่ (steady-state) การปรับค่าตัวแปรโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลสนาม (calibration) ควรมีการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและข้อมูลในสนามต่าง ๆ ดังนี้

- เฮด (ระดับแรงดันของน้ำ)
- ทิศทางการไหลของน้ำบาดาล
- ค่าเกรเดียนต์ชลศาสตร์
- สมดุลของน้ำ
- ความเข้มข้นของมวลสารปนเปื้อน (ถ้ามี)
- อัตราการเคลื่อนที่ของมวลสารปนเปื้อน (ถ้ามี)
- ทิศทางการเคลื่อนที่ของมวลสารปนเปื้อน (ถ้ามี) และ
- อัตราการสลายตัวของสารปนเปื้อน (ถ้ามี)

การเปรียบเทียบเหล่านี้ควรมีการนำเสนอในรูปแบบแผนที่ ตารางหรือเส้นกราฟ ภาพการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดและการจำลองระดับแรงดันของน้ำบาดาล แสดงไว้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าเฮดจากการวัดในสนามกับค่าที่คำนวณจากแบบจำลอง

ความแตกต่างระหว่างค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าวัดจริงในสนาม โดยทั่วไปควรจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 ของความผันแปรที่มีในข้อมูลสนาม ต่อผลที่ได้จากแบบจำลอง ความแตกต่างระหว่างค่าที่คำนวณได้และค่าที่บ่อสังเกตการณ์

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) เป็นกระบวนการตรวจสอบการตอบ สนองของพฤติกรรมของระบบน้ำบาดาลต่อความปรวนแปรของตัวแปรในแบบจำลองในช่วงที่เป็นไปได้ ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวสามารถแสดงในรูปของการเปลี่ยนแปลงของค่าเฮด หรือ ระดับแรงดันของน้ำ อัตราการไหล หรือการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ความอ่อนไหวเพื่อเป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรที่จะมีผลต่อพฤติกรรมของระบบ ประโยชน์ของการศึกษาความอ่อนไหวคือ การวิเคราะห์ว่าตัวแปรใดอาจส่งผลกระทบต่อระบบน้ำบาดาลมากที่สุด และสามารถใช้ประเมินแนวทางการเก็บข้อมูลในอนาคต เมื่อพฤติกรรมของระบบมีความอ่อนไหวต่อตัวแปรใด ตัวแปรนั้นต้องได้รับการตรวจสอบให้ถูกต้อง ในขณะที่พฤติกรรมของระบบที่ไม่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กันกับตัวแปรใด ๆจะไม่แสดงความอ่อนไหวเมื่อมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรนั้น ดังนั้นเมื่อไม่มีความอ่อนไหว จึงไม่มีความจำเป็นต้องรวบรวมคุณสมบัติของพื้นที่ศึกษานั้นในสนามเพิ่มเติม

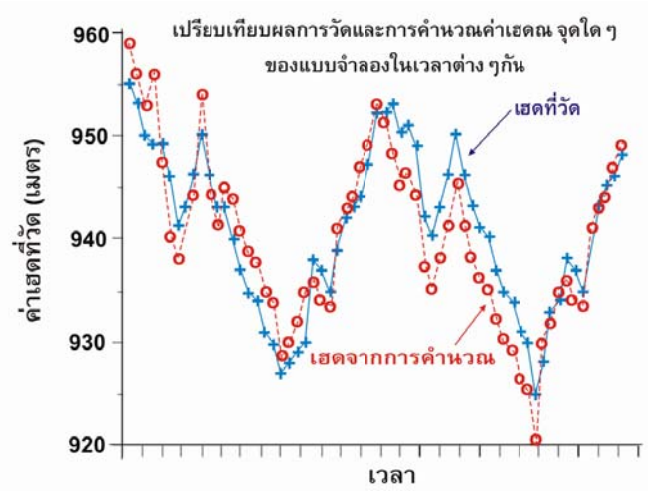
5.6 การตรวจทานวิธีการคำนวณของโปรแกรม

เมื่อทำการปรับค่าตัวแปรแล้ว อาจมีการตรวจสอบแบบจำลอง (model verification) เพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองนั้นสามารถเป็นตัวแทนของระบบอุทกธรณีวิทยาได้อย่างถูกต้อง โดยการจำลองผลการตอบสนองของตัวแปรทางอุทกธรณีวิทยาที่ปรับแก้แล้ว เปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลสนามชุดใหม่ ถ้าผลการเปรียบเทียบไม่แตกต่างจากผลการจำลองในครั้งแรกมากก็ไม่มีความจำเป็นต้องปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้คาดคะเนต่อไป

ข้อมูลประวัติของพื้นที่จะประกอบไปด้วยการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันหรือความเข้มข้นของสารละลายในน้ำบาดาลในสภาวการณ์แตกต่างกันไป (scenarios) ข้อมูลประวัติที่ดีที่สุดสำหรับการแก้ไขและปรับปรุงแบบจำลอง คือ ค่าจริงในสนามภายใต้สภาวะกดดัน (stressed conditions) หรือการสูบน้ำออกจากระบบของชั้นหินอุ้มน้ำ การตรวจสอบและปรับปรุงแบบจำลองนั้นมีความจำเป็นเพื่อจุดประสงค์ให้เกิดความแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น โดยต้องมีการปรับแก้ตัวพารามิเตอร์ของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลสนามอย่างละเอียด หลังจากแบบจำลองมีการปรับแก้ค่าตัวพารามิเตอร์ และผ่านกระบวนการตรวจสอบและปรับปรุงเปรียบเทียบกับประวัติของพื้นที่ในช่วงเวลาต่างๆ (รูปที่ 7) นั่นแสดงว่าแบบ จำลองนี้พร้อมที่จะใช้ในการคาดคะเนหรือพยากรณ์ต่อไป

5.7 การคาดคะเนผลและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

การคาดคะเนผลการคำนวณเฮดหรือระดับแรงดันของน้ำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่อาจเกิดจากเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เช่นมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มเติมน้ำ หรือการสูบน้ำ และถ้ามีการวางแผนการใช้ข้อมูลในอนาคตร่วมกับการทำนายผล และการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรบางตัวจะทำให้ผลการจำลองเปลี่ยนไปมาก และความอ่อนไหวของตัวแปรของแบบจำลองเป็นสมบัติเฉพาะของระบบนั้น ๆ ดั้งนั้นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรทำให้ทราบถึงช่วงของค่าตัวแปรที่เป็นไปได้ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการเตรียมการเฝ้าระวังข้อมูลและวิเคราะห์ในระยะยาว

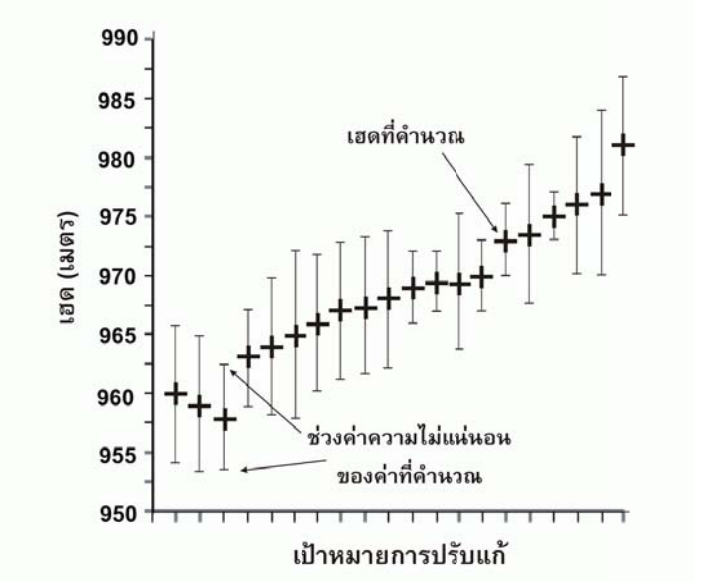


รูปที่ 7 การเปรียบเทียบระหว่างค่าเฮดได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดในสนามต่อเวลา

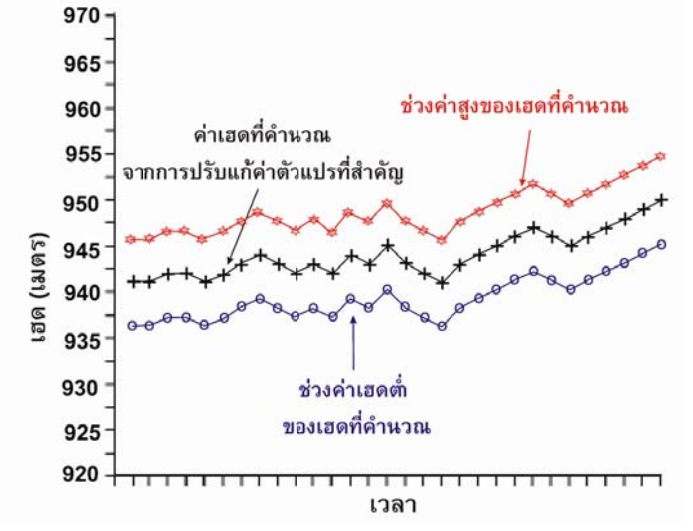
การคาดคะเนผลการไหลของน้ำบาดาลหรือสภาวะการปนเปื้อนมวลสารในน้ำบาดาลที่จะเกิดขึ้นในอนาคต แบบจำลองสามารถประเมินผลจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขทางธรรมชาติ เช่น การกักกั้นทางชลศาสตร์ (hydraulic containment), การสูบและบำบัด (pump-and-treat) หรือ การบำบัดตามธรรมชาติ (natural attenuation) และการประเมินความเสี่ยงต่อการปนเปื้อน การคาดคะเนต่างๆนี้จะสำเร็จได้ การจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการเคลื่อนที่มวลสารในน้ำจะต้องมีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ในขั้นตอนของการปรับค่าตัวแปรโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงในสนาม (calibration process) แม้ว่าจะมีการปรับค่าตัวแปรให้มีค่าใกล้เคียงกับสภาพจริงแล้วก็ตาม แบบจำลองที่มีข้อมูลไม่ครบถ้วนเพียงพอ จะทำให้ผลการคาดคะเนและวิเคราะห์การไหลของน้ำบาดาลและการเคลื่อนที่มวลสารในน้ำผิดพลาดและไม่น่าเชื่อถือ ด้วยสาเหตุนี้การคาดคะเนควรที่จะทำนายอยู่ในช่วงที่น่าเชื่อถือ โดยที่แสดงค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) ของค่าตัวแปรในแบบจำลองไว้ด้วย

ขอบเขตของความไม่แน่นอน (uncertainty) สามารถวิเคราะห์โดยวิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) ของพารามิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 8 :ซึ่งแสดงช่วงค่าจากการคำนวณความสูงของแรงดันน้ำ ณ เวลาหนึ่ง จากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในแบบจำลองซึ่งอยู่ในช่วงความไม่แน่นอน (uncertainty) ถ้าจุดประสงค์ของการคาดคะเนจากแบบจำลองเพื่อการประมาณค่าเฮด หรือ ระดับแรงดันของน้ำของในชั้นหินอุ้มน้ำในอนาคต ควรมีการกำหนดค่าขอบเขต คือ ค่าต่ำสุดและสูงสุดของเฮดหรือระดับแรงดันของน้ำปัจจุบัน

รูปที่ 9 แสดงค่าเฮด หรือ ระดับแรงดันของน้ำซึ่งคาดคะเนโดยกำหนดช่วงระยะเวลาที่มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภายในชั้นหินอุ้ม ผลการคาดคะเนที่มีการปรับค่าตัวแปรจะมีช่วงค่าที่สูงและต่ำเพื่อความเหมาะสม



รูปที่ 8 การจำลองความไม่แน่นอนของเฮด



รูปที่ 9 การทำนายช่วงค่าเฮดหรือระดับแรงดันของน้ำ

5.8 การแสดงผลการจำลอง

การแสดงผลการจำลอง (presentation of modeling design and result) ควรจะรวบรวมในประเด็นต่างๆดังนี้ที่มาของข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การออกแบบ การปรับแก้ค่าตัวแปร การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร ผลการคำนวณเชิงตัวเลข เชิงพื้นที่ ระดับความถูกต้องของผลการจำลอง ข้อจำกัด ข้อเสนอแนะ และผลสรุปตามวัตถุประสงค์ของการจำลอง

5.9 การตรวจสอบผลการจำลอง

การตรวจสอบหลังการทำนายของแบบจำลอง (post audit) ในระยะคือมีการเฝ้าระวังและเก็บข้อมูลสนามเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความแม่นยำของผลการจำลองในระยะยาว ในหลายๆกรณีอาจมีความจำเป็นต้องการออกแบบแบบจำลองใหม่ (model redesign) อาจเกิดขึ้นหลังการติดตามผลการจำลองแล้วพบว่ามีข้อมูลใหม่ ที่เพิ่มความเข้าใจในระบบอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาและพบว่าควรมีการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ ขอบเขตของหรือเงื่อนไขสภาพขอบเขตของแบบจำลอง

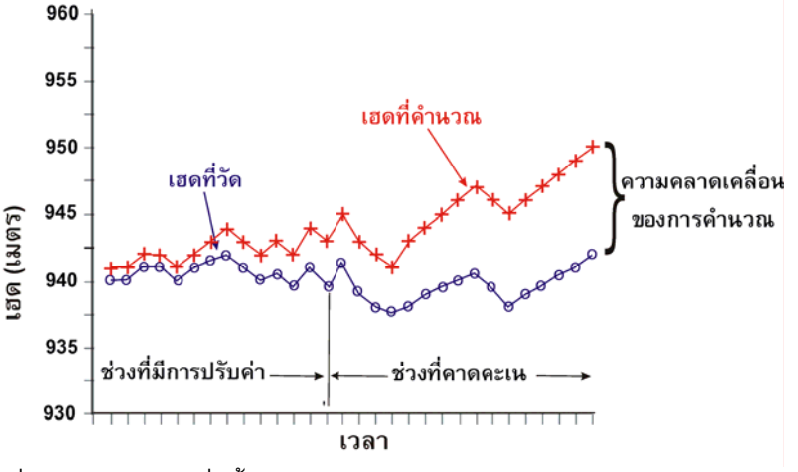
6. การเฝ้าติดตามผล

แบบจำลองน้ำบาดาลซึ่งใช้ในการทำนายทิศทางการเคลื่อนที่และความเข้มข้นของมวลสารปนเปื้อนในน้ำบาดาล ความถูกต้องแม่นยำของการคาดคะเนและความน่าถือขึ้นอยู่กับความสำเร็จในการปรับค่าตัวพารามิเตอร์ (calibration) โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณข้อมูลสนาม และการแก้ไขปรับปรุงแบบจำลอง (verification)

ข้อผิดพลาดในการทำนายของแบบจำลอง ถึงแม้ว่ามีเพียงเล็กน้อย แต่อาจส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดโดยรวมในการทำนายในอนาคต เพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้นในการทำนายสถานการณ์ในอนาคต การเฝ้าติดตามผล (performance monitoring) เป็นสิ่งจำเป็น กระบวนการนี้มีการเปรียบ เทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองกับข้อมูลสนามที่เก็บรวบรวบรวมในอนาคต เพื่อการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความผิดพลาดของการทำนายจากแบบจำลอง

การวางแผนการติดตามพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น เฮด เพื่อปรับปรุงแบบจำลอง จะทำให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงขึ้นและเกิดความผิดพลาดในการพยากรณ์น้อยที่สุดความน่าเชื่อถือของการคาดคะเนนั้นขึ้นอยู่กับการพัฒนาแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (conceptual model) ค่าตัวแปรอุทกธรณีวิทยา หรือธรณีเคมีที่ใช้ในแบบจำลอง

และสูตรคำนวณที่ใช้แก้ปัญหาในแบบจำลอง ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในตัวแปรของแบบจำลอง หรือความแตกต่างระหว่างสภาพจริงในสนาม และในแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ หรือสูตรการคำนวณของแบบจำลอง ทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำนาย การปรับแก้ค่าตัวแปรในแบบจำลองนั้นสามารถช่วยลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองให้มีน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่ใช้ในช่วงการปรับแก้ค่าตัวแปรในแบบจำลองเป็นช่วงสั้นๆ เมื่อเทียบกับระยะเวลาที่แบบจำลองทำนาย



รูปที่ 10 ตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของค่าความผิดพลาดจากการทำนายจากแบบจำลอง

การเฝ้าติดตามผลนั้นต้องมีการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกายภาพของระบบอุทกธรณีและความสัมพันธ์กับสิ่งที่อยู่แวดล้อม การคาดคะเนจากแบบจำลองเป็นการประมาณ ซึ่งไม่สามารถใช้แทนค่าที่วัดจริงในสนามได้ ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของมวลสารในน้ำบาดาลที่ต้องมีการเฝ้าติดตามผล มีดังต่อไปนี้

- ระบบกักกั้นทางชลศาสตร์ (hydraulic containment systems) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของสารเคมีและค่าเฮด (hydraulic head)

- groundwater surfacewater interface (GSI) ที่เป็นบริเวณของการผสมกันของสารเคมีในน้ำบาดาลกับน้ำผิวดิน ซึ่งต้องอาศัยข้อกำหนด (criteria) ที่เหมาะสม

- การฟื้นฟูสภาพโดยธรรมชาติ (natural attenuation remedies) โดยที่แบบจำลองการเคลื่อน ที่มวลสารในน้ำบาดาลสามารถทำนายไว้เฉพาะพื้นที่นั้นๆ ซึ่งเกิดขึ้นได้ในขอบเขตหรือสภาวะจำกัด

การเฝ้าติดตามผลขึ้นอยู่กับสภาพของพื้นที่ปัญหาที่ต้องการแก้ และผลการจำลองเบื้องต้นและความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในพื้นที่ท้ายน้ำ ตัวอย่าง เช่น การกักกั้นทางชลศาสตร์ของกลุ่มสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลโดยใช้ระบบสูบและบำบัดต้องมีการติดตามสังเกตการค่าเฮด อย่างละเอียดและต่อเนื่องโดยมีการวัดคุณภาพของน้ำร่วมด้วย ตำแหน่งที่มีการวัดค่าระดับแรงดันน้ำควรจะกระจายครอบคลุมพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงเฮดหรือระดับแรงดันของน้ำ การติดตามคุณสมบัติเคมีของน้ำบาดาลตามทิศทางและระบบการไหลของน้ำ

การเฝ้าติดตามผล นั้นยังขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและดัชนีทางเคมีที่เลือกตรวจวัดให้มีความเหมาะสำหรับพื้นที่และปัญหาที่ศึกษา

7. การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

7.1 แบบจำลองการจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล

แบบจำลองที่ใช้ในการจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลนั้นมี 2 ประเภท คือ แบบจำลองการไหลหรือการแพร่กระจายมวลสารในชั้นน้ำบาดาล (groundwater flow and transport model หรือ simulation model) ซึ่งใช้ในการจำลองผลกระทบจากการจัดการ

ทรัพยากรน้ำบาดาลแบบต่างๆ และแบบจำลองค่าหมาะสมที่สุด (optimization model) ปัจจุบันการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลให้มีประสิทธิภาพควรเชื่อมโยงแบบจำลองทั้ง 2 ชนิดด้วยกัน (simulation-optimization model) (Todd and Mays, 2005) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลได้ในหลายกรณีด้วยกัน เช่น การศึกษาปริมาณน้ำที่สามารถสูบใช้ได้สูงสุดโดยไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (safe yield) การบริหารจัดการการใช้ทรัพยากรน้ำผิวดินร่วมกับน้ำใต้ดิน (conjunctive management of surface water and groundwater) การจำลองเพื่อกำหนดมาตรการที่เหมาะสมในการฟื้นฟูพื้นที่มีสารปนเปื้อนต่อแหล่งน้ำบาดาล (groundwater contamination site) การเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเติมน้ำหรือสูบน้ำเพื่อควบคุมการแพร่กระจายของน้ำใต้ดินเค็ม (seawater intrusion control) และการลดระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ก่อสร้างหรือเหมืองแร่ (dewatering) เป็นต้น โดยทั่วไปแบบจำลองการบริหารจัดการน้ำบาดาลมีกระบวนการทำงานแสดงดังในรูปที่ 11

7.2 แบบจำลองค่าเหมาะสมที่สุด

แบบจำลองค่าเหมาะสมที่สุด(optimization model) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการบริหารจัดการให้ได้รับผลการบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพที่สุดตามข้อกำหนดหรือกรอบที่กำหนดขึ้นเป็นเกณฑ์ ซึ่งอาจเป็นเกณฑ์เชิงเศรษฐ์ศาสตร์และสังคมหรือสิ่งแวดล้อม โดยแบบจำลองประเภทนี้จะประกอบด้วยฟังก์ชั่นจุดประสงค์ (objective function) ที่เป็นระบบการประเมินผลจากการบริหารจัดการ และโดยเป็นการประเมินจากการจำลองการเปลี่ยนแปลงตัวแปรออกแบบ (design variables) ให้เป็นเงื่อนไขบังคับ (constraints) ของแบบจำลอง

แบบจำลองการบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพสูงสุด มีลักษณะของกรอบการทำงาน คือ

Optimize f(x)

โดยมีปัจจัยควบคุม คือ G(x) = 0

และมีขอบเขตของเงื่อนไขบังคับที่กำหนดจากตัวแปรในการตัดสินใจ คือ $x_l < x < x_u$

เมื่อ x_l และ x_u คือ ปริมาณเวกเตอร์ที่เป็นขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปรตามลำดับ โดยผลการบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ กลุ่มของข้อมูลที่ทำให้ได้ผลที่ดีที่สุดกับเงื่อนไขบังคับและฟังก์ชั่นจุดประสงค์ (objective function)

ปัญหาด้านการบริหารจัดการให้ได้เหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบจำลองเชิงเส้น (lnear programming, LP) ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยควบคุม และกรอบเป้าประสงค์ ที่เป็นแบบเส้นตรง และแบบจำลองที่ไม่เชิงเส้น (nonlinear programming, NLP) ซึ่งมีกรอบเป้าประสงค์ ที่ไม่เป็นเส้นตรง และมีปัจจัยควบคุมที่เป็นเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรง โดยแบบจำลองเชิงเส้นนิยมใช้อย่างกว้างขวางในการจัดสรรทรัพยากร

รูปแบบของแบบจำลองเส้นตรงโดยทั่วไป คือ

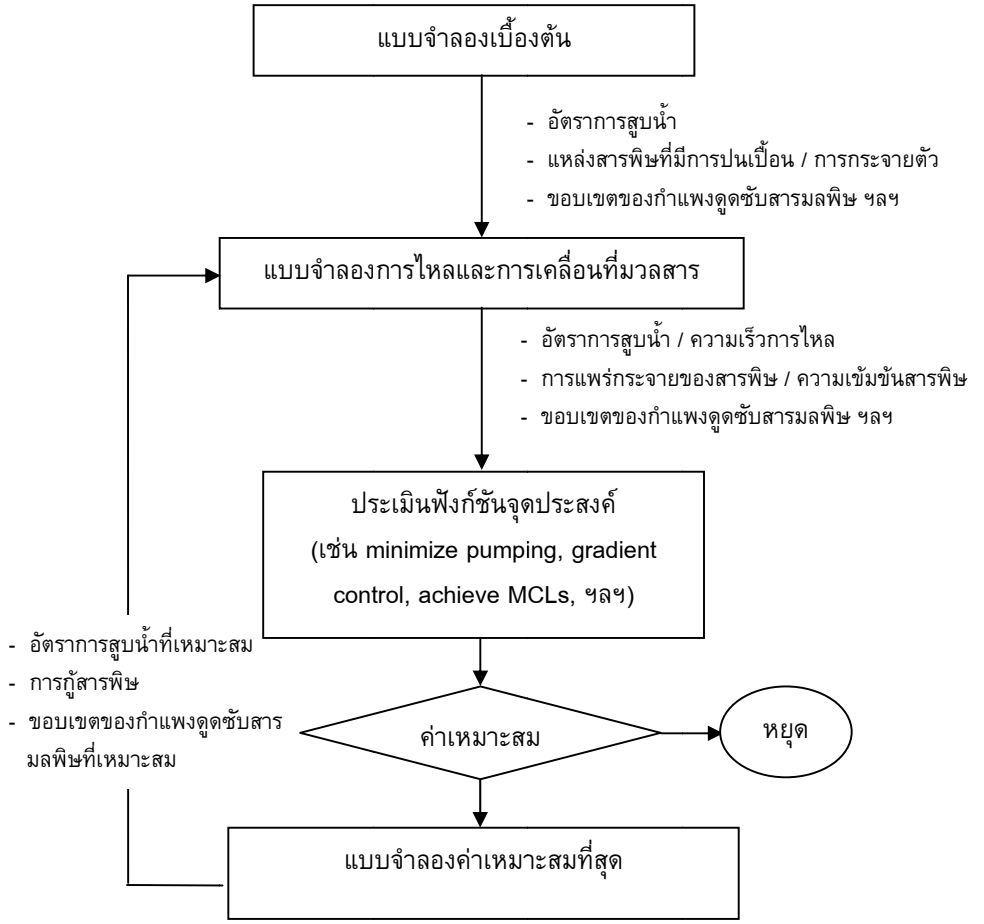
Max (or Min) $X_0 = \sum c_j X_j$

ซึ่งเป็นกรอบเป้าประสงค์แบบเส้นตรงภายใต้ขอบเขตของปัจจัยควบคุม คือ

$\sum a_{ij} X_j < b_i$

$X_j < 0$

เมื่อ c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกรอบเป้าประสงค์ (objective function coefficient) และ a คือ สัมประสิทธิ์ของเทคโนโลยี (technological coefficient) และ b คือ สัมประสิทธิ์ขวามือ (right-hand side RHS coefficient) โดยมีวิธีการหลายเทคนิควิธีในการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข วิธีการที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง คือ Simplex method (Todd and Mays, 2005)



รูปที่ 11 กระบวนการทำงานของแบบจำลองบริหารจัดการน้ำบาดาล
(ดัดแปลงจาก Todd and Mays, 2005)

8. เอกสารอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ ศรีสุข, 2540. น้ำบาดาล-แบบจำลอง-การปนเปื้อน เอกสารประกอบการสอนวิชาอุทกธรณีวิทยา II, ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ASTM, 1993. Standard Guide for Application of a Ground-Water Flow Model to a Site-Specific Problem ,5447-93.

ASTM, 1995. Standard Guide for Subsurface Flow and Transport Modeling, D5880-95.

ASTM, 1996. Standard Guide for Calibrating a GroundWater Flow Model Application , 5918-96.

ASTM, 1994. Standard Guide for Conducting a Sensitivity Model Application, D5611-94.

Anderson, M.P., and Woessner, W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, Inc., 381 p.

Bear, J., and Verruijt A., 1987. Modeling Groundwater Flow and Pollution, D. Reidel Publishing Company, 414 p.

De Marsily, G., 1986. Quantitative Hydrogeology, Academic Press,440 p.

Domenico, P.A., and Schwartz, F.W., 1998. Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley and Sons, New York.

Freeze, R.A., and Cherry, J.A., 1979. Groundwater, Prentice Hall., Englewood Cliffs, N.J.

Guigure, N., and Franz, T., 1998. Visual MOD-FLOW. V.2.1, The Integrated Modeling Environment for MODFLOW and MODPATH. Waterloo Hydrogeologic Software,Waterloo, Ontario, Canada.

HydroGeoLogic Inc., 1997. Groundwater Modeling and Mass Transport, Workshop at Khon Kaen University, 12-21 May 1997.

Mandle, R.J., 2002. Groundwater Modeling Guidance, Groundwater Modeling Program. Michigan Department of Environmental Quality, Draft 1.0 10/16/02.

McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model, US Geol. Surv. Tech. Water Resour. Invest., Book. 6, 472 pp.

Mercer, J.W., and Faust, C.R., 1980. Groundwater Modeling Mathematical Models, Groundwater, V.B, No.3, P.212-227.

Spitz, K., and Moreno, J., 1996. A Practical Guide to Groundwater and Solute Modeling, John Wiley and Sons, Inc, 441p.

Tood, D.K., and May, L.W., 2005. Ground-water hydrology, 3rd ed. New York, John Wiley and Sons.

Zheng, C., and Bennette, G.D., 2002. Applied Contaminant Transport Modeling, Wiley Inter-Science, 621 p.

Zheng, C., 1996. A Modular Three-Dimensional Transport Model for simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reaction of Contaminants in Groundwater Systems (MT3D) Reference Manual, Waterloo Hydrogeologic, SS. Papadopulos & Associate, Inc. Rockville, Maryland 20852.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
49 ชั้น 8 อาคารกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม ซอย 30
ถ.พระราม 6 แขวงพญาไท เขตพญาไท กรุงเทพฯ
Website : http://www.dgr.go.th