กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

โครงการศึกษาทดลองการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินผ่านระบบสระน้ำ พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง จังหวัดพิษณุโลก สุโขทัย และพิจิตร

Pilot Study and Experiment on Managed Aquifer Recharge Using Ponding System in the Lower North Region River Basin, Phitsanulok, Sukhothai, and Pichit Provinces

รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร
Executive Summary Report

(ไทย–English)

จัดทำโดย

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

มีนาคม 2554

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

โครงการศึกษาทดลองการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ผ่านระบบสระน้ำ พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง จังหวัดพิษณุโลก สุโขทัย และพิจิตร

รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร

จัดทำโดย

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

มีนาคม 2554

รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร

เจ้าของโครงการ

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

จัดทำโดย

มหาวิทยาลัยขอนแก่น
กระทรวงศึกษาธิการ

ที่ปรึกษาโครงการ

นายปราณีต ร้อยบาง	อธิบดีกรมทรัพยากรน้ำบาดาล
นายสุพจน์ เจิมสวัสดิพงษ์	รองอธิบดีกรมทรัพยากรน้ำบาดาล
นายสัมฤทธิ์ ชุษณะทัศน์	รองอธิบดีกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

คณะกรรมการดำเนินการจ้างที่ปรึกษาโดยวิธีตกลง

นายสัมฤทธิ์ ชุษณะทัศน์	ประธานกรรมการ
นายประเสริฐ หมู่มาก	กรรมการ
นายสุกรี บูรณะสรรค์	กรรมการ
น.ส.รัตนาวดี โกศล	กรรมการ
นายไกรศร สังฆจันทร์	กรรมการ

คณะกรรมการตรวจสอบงาน

นายสิทธิศักดิ์ มั่นอยู่	ประธานกรรมการ
นายเกรียงศักดิ์ ภิระไร	กรรมการ
นางอัญชลี พงษ์สถิตย์พัฒน์	กรรมการ
นางเสาวนีย์ สังฆจันทร์	กรรมการ
น.ส.อุไร บางยี่ขัน	กรรมการ

คณะที่ปรึกษา

รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ศรีสุข	หัวหน้าโครงการ ผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยา
นายสมชัย วงศ์สวัสดิ์	รองหัวหน้าโครงการและผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยา
นายวิฑิต ศิริโภคากิจ	ที่ปรึกษาด้านอุทกธรณีวิทยา
ดร.ทวีศักดิ์ ศิลกุล	ที่ปรึกษาด้านธรณีฟิสิกส์
Dr. Paul Pavelic	ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการระบบเติมน้ำ
นายเจริญ เชื่อมไธสง	ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและก่อสร้างสระเติมน้ำ
รศ.ดร.วิชัย ศรีบุญลือ	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำ
นายธีรวัชร อินทรสูต	ผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยา
นายธีรศักดิ์ ตั้งสุทธินนท์	ผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยา
ผศ.หล้า อาจวิชัย	ผู้เชี่ยวชาญด้านธรณีวิทยา
นายเจตต์ จุลวงษ์	ผู้เชี่ยวชาญด้านธรณีฟิสิกส์
ดร.กฤติกา ตระกูลงาม	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
นายโพยม สราภิรมย์	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมโยธา
นายเกษม จิตทยานันท์	ผู้ประสานงานโครงการฝ่ายสนาม
น.ส.เกวรี พลเกิ้น	ผู้ประสานงานโครงการฝ่ายวิชาการและวิศวกรแหล่งน้ำ
นายสุวันชัย นาดี	นักวิชาการด้านวิศวกรรมดินและน้ำ
น.ส.ธิดารัตน์ โคตนนท์	นักอุทกธรณีวิทยา
น.ส.ศิริรัตน์ อุปสิทธิ์	นักอุทกธรณีวิทยา
นายประยุทธ เสนชัย	นักอุทกธรณีวิทยา
น.ส.เพ็ญลดา บุญสงกา	นักอุทกธรณีวิทยา
นายสุรพัฒน์ แสงทวีป	นักอุทกธรณีวิทยา
น.ส.อภิญญา อินจันทร์	นักอุทกธรณีวิทยา

สรุปโครงการ

กรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้จัดทำโครงการศึกษาทดลองการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลหรือชั้นน้ำใต้ดินที่เป็นตะกอนกรวดและทรายผ่านระบบสระน้ำ ในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างครอบคลุมพื้นที่ จ.พิษณุโลก สุโขทัย และพิจิตร ในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ.2552 - เมษายน พ.ศ.2554 โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาทดลองวิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลผ่านระบบสระน้ำหรือระบบอื่นๆ 2) ศึกษากระบวนการทางกายภาพ ชลศาสตร์ และเคมีของการเติมน้ำ 3) เป็นแนวทางการแก้ไขปัญหาภัยแล้งและอุทกภัยเชิงบูรณาการ 4) นำผลการศึกษาวิจัยและทดลองเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติ และ 5) สร้างองค์ความรู้และการถ่ายทอดเทคโนโลยี การดำเนินงานประกอบด้วยงานที่สำคัญ ได้แก่ การศึกษาสภาพอุทกธรณีวิทยา การศึกษาการใช้น้ำบาดาล การคัดเลือกพื้นที่เหมาะสม การทดลองเติมน้ำผ่านสระ การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์ การศึกษาแนวทางการจัดทำแผนหลักเพื่อแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาล การฝึกอบรมเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องและประชาชน และการจัดประชุมนำเสนอและเผยแพร่ผลการศึกษา

พื้นที่ศึกษาแบ่งออกเป็นพื้นที่ 5 ขนาดตามขั้นตอนการคัดเลือกพื้นที่เหมาะสมในการเติมน้ำ คือ 1) พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง จ.พิษณุโลก สุโขทัย และพิจิตร ขนาด 13.31 ล้านไร่ (21,300 ตร.กม.) 2) พื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่บริเวณด้านตะวันตกของแม่น้ำยมขนาด 600,000 ไร่ (972 ตร.กม.) 3) พื้นที่ศึกษาขั้นรายละเอียดในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองลานบ้าขนาด 7,500 ไร่ (12 ตร.กม.) 4) พื้นที่นำร่องบ้านหนองนา 2,575 ไร่ (4.12 ตร.กม.) และพื้นที่ก่อสร้างระบบเติมน้ำ 8 ไร่ (0.01 ตร.กม.) ตั้งอยู่ที่บ้านหนองนา ต.หนองกุลา อ.บางระกำ จ.พิษณุโลก

ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างมีแหล่งน้ำบาดาลขนาดใหญ่ในชั้นตะกอนกรวดและทรายของลุ่มน้ำยมและน่าน เกษตรกรสูบน้ำบาดาลจากชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น 10-15 ม.จากผิวดินขึ้นมาใช้ในการทำนาประมาณปีละ 7,500 ล้าน ลบ.ม. ทำให้มีรายได้ประมาณปีละ 25,000 ล้านบาท แต่ในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมาระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างต่อเนื่องประมาณปีละ 10-25 ซ.ม. ทำให้เกิดพื้นที่วิกฤติที่มีระดับน้ำบาดาลลึกมากกว่า 8 ม. จากผิวดิน ประมาณ 6.6 ล้านไร่ (10,560 ตร.กม.) ทั้งนี้หากยังคงมีการใช้น้ำบาดาลในปริมาณนี้และไม่มีการแก้ไขปัญหาในอีก 10 ปีข้างหน้าพื้นที่วิกฤติจะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 100,000 ไร่ (160 ตร.กม.) และระดับน้ำบาดาลจะลึกลงไปอีก 1.0-2.5 ม. ปัจจุบันเกษตรกรส่วนใหญ่ทรุดบ่อลึกจากผิวดิน 4-10 ม. เพื่อให้สามารถสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ได้ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการทรุดบ่อและค่าน้ำมันในการสูบน้ำบาดาลที่เพิ่มขึ้นสะสมจากระดับน้ำบาดาลที่ลดลงอย่างต่อเนื่องในอีก 10 ปีข้างหน้าประมาณ 4,300 ล้านบาท และจะเพิ่มขึ้นเป็น 16,000 ล้านบาทในอีก 20 ปีข้างหน้า

การศึกษาทดลอง การออกแบบและก่อสร้าง และการทดลองระบบเติมน้ำบาดาลผ่านระบบสระเติมน้ำได้ดำเนินการในพื้นที่ขนาด 8 ไร่ ประกอบด้วย ระบบผันน้ำ ระบบบำบัดน้ำดิบเบื้องต้นแบบบึงประดิษฐ์ ระบบเติมน้ำหรือสระเติมน้ำขนาด 1 ไร่ (1,600 ตร.ม.) และระบบติดตามตรวจสอบ พบว่าบึงประดิษฐ์ที่ทำการออกแบบสามารถลดความขุ่นได้ประมาณร้อยละ 70 และสระเติมน้ำสามารถเติมน้ำหลากที่ระบายทิ้งในช่วงฤดูฝนได้ประมาณ 26,000 ลบ.ม. ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นน้ำบาดาลที่สามารถนำ

น้ำกลับมาใช้ในการปลูกข้าวได้ 16 ไร่ มีอัตราการซึมตั้งแต่ 0.05-0.20 ม./วัน หรือมีอัตราการเติมน้ำอยู่ในช่วง 60-2,460 ลม.ม./วัน/ตร.ม. และยังไม่พบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีของน้ำบาดาลหลังการเติมน้ำ

ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของระบบเติมน้ำนำร่องด้วยวิธีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายพบว่า หากขยายผลไปยังพื้นที่อื่นระบบเติมน้ำควรมีขนาดตั้งแต่ 5 ไร่ ขึ้นไปจึงจะคุ้มทุนภายในระยะเวลา 4 ปี โดยระบบสระเติมน้ำที่มีขนาดมากกว่า 10 ไร่ขึ้นไปมีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบขนาดเล็กมากและจะคุ้มทุนภายในระยะเวลา 3 ปี

การจำลองเพื่อวางแผนการเติมน้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์พบว่า น้ำฝนและน้ำหลากสามารถซึมผ่านลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นประมาณร้อยละ 5-55 ของปริมาณน้ำฝน ซึ่งยังไม่พอเพียงกับการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ดังนั้นการพัฒนาระบบเติมน้ำผ่านสระร่วมกับการเติมน้ำผ่านบ่อบาดาลระดับลึกเพื่อให้ระดับน้ำบาดาลสมดุลในเวลา 10 ปีข้างหน้า ต้องใช้สระเติมน้ำประมาณ 8,000ไร่ ร่วมกับพื้นที่บ่อทรายเก่า 2,550 ไร่ มีพื้นที่ได้รับประโยชน์ 146,700 ไร่ มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนเติมน้ำระยะเวลา 10 ปี เป็นเงินประมาณ 3,170 ล้านบาท ทำให้เกษตรกรมีรายได้จากการปลูกข้าวจากน้ำที่สูบกลับมาใช้ประมาณ 11,200 ล้านบาท และกรณีเติมน้ำในพื้นที่วิกฤติเพื่อให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น 2 ม. ต้องใช้พื้นที่ 18,900 ไร่ สามารถเติมน้ำได้ปีละ 1,044 ล้าน ลบ.ม.และมีพื้นที่ได้รับประโยชน์ 365,000 ไร่ เสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนประมาณ 4,830 ล้านบาท เกษตรกรจะมีรายได้จากการปลูกข้าวประมาณปีละ 27,850 ล้านบาท นอกจากนี้ยังช่วยลดพื้นที่ภัยแล้งและพื้นที่น้ำท่วมได้ 20 ตำบล และลดปริมาณน้ำหลากที่ระบายลงสู่แม่น้ำสายหลักประมาณปีละ1,400 ล้าน ลบ.ม และบรรเทาพื้นที่น้ำท่วมได้ประมาณ 2 ล้านไร่ (3,200 ตร.กม.)

การเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการลดระดับน้ำใต้ดินและนอกจากนี้ยังช่วยบรรเทาปัญหาภัยแล้งและน้ำท่วม การพัฒนาระบบเติมน้ำใต้ดินในพื้นที่อื่นๆ ขั้นต่อไปควรมีการจัดทำแผนหลักการเติมน้ำแบบบูรณาการในพื้นที่วิกฤติ เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนการสร้างระบบเติมน้ำในพื้นที่ต่างๆ โดยมีกรมทรัพยากรน้ำบาดาลเป็นหน่วยงานสนับสนุนด้านวิชาการและประสานงานกับหน่วยงานต่างๆ ซึ่งมีกิจกรรมและหน่วยงานรับผิดชอบดังนี้ 1) ขุดลอกลำน้ำตื้นเขินหรือคลองระบายน้ำในเขตทางหลวงสาธารณะให้ถึงระดับชั้นทราย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำและเป็นการเติมน้ำหลากลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน โดยมีองค์การปกครองส่วนท้องถิ่น กรมชลประทาน กรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทเป็นหน่วยงานรับผิดชอบ 2) เร่งรัดการจัดทำแหล่งกักเก็บน้ำบริเวณต้นน้ำโดยมีกรมชลประทานเป็นหน่วยงานรับผิดชอบ 3) เร่งขยายการก่อสร้างฝายชะลอน้ำ ฝายเติมน้ำในพื้นที่ป่าไม้และเขตวนอุทยานแห่งชาติ โดยมีกรมป่าไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืชเป็นหน่วยงานรับผิดชอบ 4) เร่งรัดให้มีการเติมน้ำในพื้นที่ประสบภัยแล้งซ้ำซาก โดยมีองค์การปกครองส่วนท้องถิ่นเป็นหน่วยงานรับผิดชอบ 5) ส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการเติมน้ำผ่านการเก็บเกี่ยวน้ำฝนในสถานที่ราชการ 6) อนุรักษ์และพัฒนาพื้นที่เติมน้ำตามธรรมชาติ เช่น บ่อทรายเก่า คู คลองสาธารณะ โดยมีองค์การปกครองส่วนท้องถิ่นเป็นหน่วยงานรับผิดชอบ นอกจากนี้กรมทรัพยากรน้ำบาดาลควรเร่งสร้างจิตสำนึกและปลูกฝังความรู้ความเข้าใจในคุณค่าของแหล่งน้ำใต้ดินและ

ความสำคัญของการเติมน้ำใต้ดิน พร้อมจัดทำแผนหลักการเติมน้ำใต้ดิน และผลักดันให้เป็นส่วนหนึ่งของการจัดการทรัพยากรน้ำของชาติ

ความสำเร็จของการพัฒนาระบบการเติมน้ำในอนาคตจะเกิดจากการปฏิบัติตามแผนหลักและการพัฒนาการเติมน้ำอย่างเป็นระบบบนพื้นฐานของผลการศึกษาวิจัยด้านต่างๆ เช่น การบำบัดคุณภาพน้ำเบื้องต้น ชลศาสตร์ของชั้นน้ำบาดาล คุณภาพน้ำบาดาล การคัดเลือกวิธีการเติมน้ำที่เหมาะสม การป้องกันการอุดตันของสระเติมน้ำ การบำรุงรักษา ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

สารบัญ

		หน้า
สรุปโครงการ		**ค**
บทที่ 1	**บทนำ**	**1-1**
1.1	เหตุผลและความเป็นมา	1-1
1.2	วัตถุประสงค์	1-1
1.3	ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ	1-1
บทที่ 2	**การเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล**	**2-1**
2.1	หลักการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล	2-1
2.2	วิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล	2-1
2.3	แนวทางการตัดสินใจพัฒนาระบบการกักเก็บน้ำในชั้นน้ำบาดาล	2-3
2.4	การจัดการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาล	2-3
บทที่ 3	**พื้นที่ศึกษา**	**3-1**
3.1	การคัดเลือกพื้นที่ศึกษา	3-1
3.2	สภาพอุทกธรณีวิทยา	3-2
	3.2.1 พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง	3-2
	3.2.2 พื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่	3-2
	3.2.3 พื้นที่ศึกษาขั้นรายละเอียด	3-7
	3.2.4 พื้นที่นำร่องบ้านหนองนา	3-7
	3.2.5 พื้นที่ก่อสร้างระบบสระเติมน้ำ	3-8
3.3	การจำลองการไหลของน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์	3-11
	3.3.1 วัตถุประสงค์การจำลอง	3-11
	3.3.2 การปรับเทียบค่าพารามิเตอร์	3-12
	3.3.3 การทดสอบความอ่อนไหวของตัวแปร	3-12
	3.3.4 ผลการจำลอง	3-12
3.4	สาระสำคัญ	3-15
บทที่ 4	**การทดลองเติมน้ำ การประเมินผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายเบื้องต้น**	**4-1**
4.1	การออกแบบและก่อสร้างระบบเติมน้ำ	4-1
4.2	การทดสอบระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ	4-3
4.3	การทดลองเติมน้ำ	4-3
	4.3.1 การทดลองการซึมผ่านชั้นตะกอนในห้องปฏิบัติการและสระทดลองขนาดเล็ก	4-3
	4.3.2 การทดลองเติมน้ำผ่านสระ	4-4

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
4.4	การติดตามผลกระทบด้านระดับและคุณภาพน้ำบาดาล	4-4
4.5	การจัดการและบำรุงรักษาระบบเติมน้ำผ่านสระ	4-4
4.6	การประเมินผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายเบื้องต้น	4-5
4.7	สาระสำคัญ	4-5
บทที่ 5	**แนวทางการจัดทำแผนหลักการเติมน้ำบาดาล และการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาล**	**5-1**
5.1	แนวทางการจัดทำแผนหลัก	5-1
	5.1.1 องค์ประกอบ	5-1
	5.1.2 เป้าประสงค์ของแผนหลัก	5-1
	5.1.3 ประเด็นยุทธศาสตร์ของแผนการเติมน้ำบาดาล	5-2
	5.1.4 กลยุทธ์และแผนงานเบื้องต้น	5-2
5.2	แนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาล	5-5
	5.2.1 แนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาล ในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนาและพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่	5-5
	5.2.2 แนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาล ในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง	5-6
5.3	แผนบูรณาการการพัฒนาระบบเติมน้ำ	5-16
5.4	สาระสำคัญ	5-17
	5.4.1 แนวทางการจัดทำแผนหลักหลักการจัดการเติมน้ำบาดาล	5-17
	5.4.2 แนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา	5-17
บทที่ 6	**วิจารณ์และข้อเสนอแนะ**	**6-1**
เอกสารอ้างอิง		**7-1**

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3-1 สัดส่วนการใช้น้ำเพื่อการเกษตรพื้นที่นำร่องบ้านหนองนา 3-8
ตารางที่ 3-2 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง 3-11
ตารางที่ 4-1 ความเหมาะสมของระบบเติมน้ำแบบต่างๆ 4-6
ตารางที่ 5-1 ตำบลภัยแล้งที่เติมน้ำให้ระดับน้ำเพิ่มขึ้น 2 เมตร 5-11
ตารางที่ 5-2 ตำบลที่ได้รับการบรรเทาภัยน้ำท่วมจากการเติมน้ำ 5-11
ตารางที่ 5-3 วิธีการเติมน้ำในพื้นที่วิกฤติมากที่สุด 5-12
ตารางที่ 5-4 วิธีการเติมน้ำในพื้นที่วิกฤติมาก 5-13
ตารางที่ 5-5 วิธีการเติมน้ำในพื้นที่วิกฤติปานกลาง 5-14
ตารางที่ 5-6 ปัจจัยในการคัดเลือกวิธีการเติมน้ำ 5-15
ตารางที่ 5-7 แผนบูรณาการการพัฒนาระบบเติมน้ำ 5-16

สารบัญรูป

รูปที่ 1-1 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ 1-2
รูปที่ 2-1 วิธีการจัดการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่ลุ่มน้ำ 2-1
รูปที่ 2-2 วิธีการในการจัดการการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล 2-2
รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการคัดเลือกพื้นที่ศึกษา 3-1
รูปที่ 3-2 สภาพภูมิประเทศและการใช้ประโยชน์ที่ดินพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง 3-3
รูปที่ 3-3 แผนที่อุทกธรณีวิทยาพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง 3-4
รูปที่ 3-4 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง 3-5
รูปที่ 3-5 แผนที่อุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่บริเวณด้านตะวันตกของแม่น้ำยม 3-6
รูปที่ 3-6 แผนที่อุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยลานบ้า 3-9
รูปที่ 3-7 แผนที่อุทกธรณีวิทยาของพื้นที่นำร่องบ้านหนองนา 3-10
รูปที่ 3-8 ผลการจำลองทิศทางการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนา 3-13
รูปที่ 3-9 ผลการจำลองทิศทางการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่ 3-14
รูปที่ 4-1 องค์ประกอบของระบบเติมน้ำ 4-2
รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดระบบเติมน้ำและอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย 4-6

บทที่ 1
บทนำ

1.1 เหตุผลและความเป็นมา

พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างครอบคลุมจังหวัดพิษณุโลก สุโขทัย และพิจิตร เกษตรกรในพื้นที่สูบน้ำบาดาลระดับตื้นขึ้นมาใช้ปริมาณมากในระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา ทำให้ระดับน้ำบาดาลหรือน้ำใต้ดินลดลงอย่างต่อเนื่องประมาณปีละ 10 - 25 ซม.เกษตรกรส่วนใหญ่ต้องทรุดบ่อลงไปที่ความลึก 4-10 ม. จากผิวดิน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายจากการทรุดบ่อและการสูบน้ำเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้พื้นที่ดังกล่าวยังประสบปัญหาน้ำท่วมและภัยแล้งเป็นประจำ กรมทรัพยากรน้ำบาดาลจึงได้จัดทำโครงการศึกษาทดลองการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินผ่านระบบสระน้ำหรือระบบอื่นๆ ที่เหมาะสม เพื่อแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาล และยังสามารถแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำโดยการระบายน้ำผิวดินในช่วงฤดูน้ำหลากลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและนำกลับขึ้นมาใช้ในช่วงฤดูแล้ง โดยใช้งบประมาณจากกองทุนพัฒนาน้ำบาดาล และมอบหมายให้ศูนย์วิจัยน้ำบาดาล มหาวิทยาลัยขอนแก่น ทำการศึกษาทดลองออกแบบก่อสร้าง และทดลองเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินผ่านระบบสระน้ำ และขยายผลการศึกษาในพื้นที่อื่นๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาทดลองหาวิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลผ่านระบบสระน้ำหรือระบบอื่นๆ ที่เหมาะสมในพื้นที่ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูง

1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการทางกายภาพ ชลศาสตร์ และเคมี ของการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล

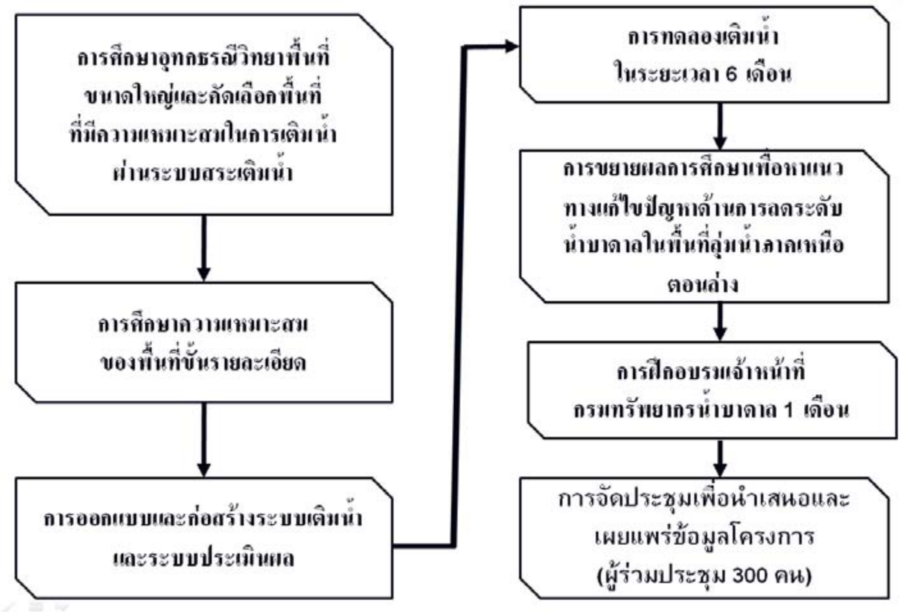
1.2.3 เพื่อเป็นแนวทางการแก้ไขปัญหาภัยแล้งเชิงบูรณาการโดยการใช้แหล่งน้ำผิวดินและน้ำบาดาลตามช่วงเวลาที่เหมาะสม

1.2.4 เพื่อสรุปผลการศึกษาวิจัยและทดลองเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานด้านการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล หรือโครงการอื่นๆ ที่มีลักษณะเดียวกันต่อไปในอนาคต

1.2.5 เพื่อสร้างองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีวิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลผ่านสระน้ำให้กับประชาชนและองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นโดยส่งเสริมให้ประชาชนมีส่วนร่วม

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ

การดำเนินงานโครงการประกอบด้วยงานหลักที่สำคัญ ได้แก่ การศึกษาสภาพอุทกธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ การศึกษาการใช้น้ำบาดาล การคัดเลือกพื้นที่เหมาะสม การทดลองเติมน้ำผ่านสระ การศึกษาแนวทางแก้ไขปัญหาด้านการลดระดับน้ำบาดาล การฝึกอบรมเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องและประชาชน และการจัดประชุมเพื่อนำเสนอและเผยแพร่ข้อมูลโครงการ (รูปที่ 1-1) โครงการเริ่มดำเนินการตั้งแต่เมษายน พ.ศ.2552 ถึงเดือน เมษายน 2554



รูปที่ 1-1 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ

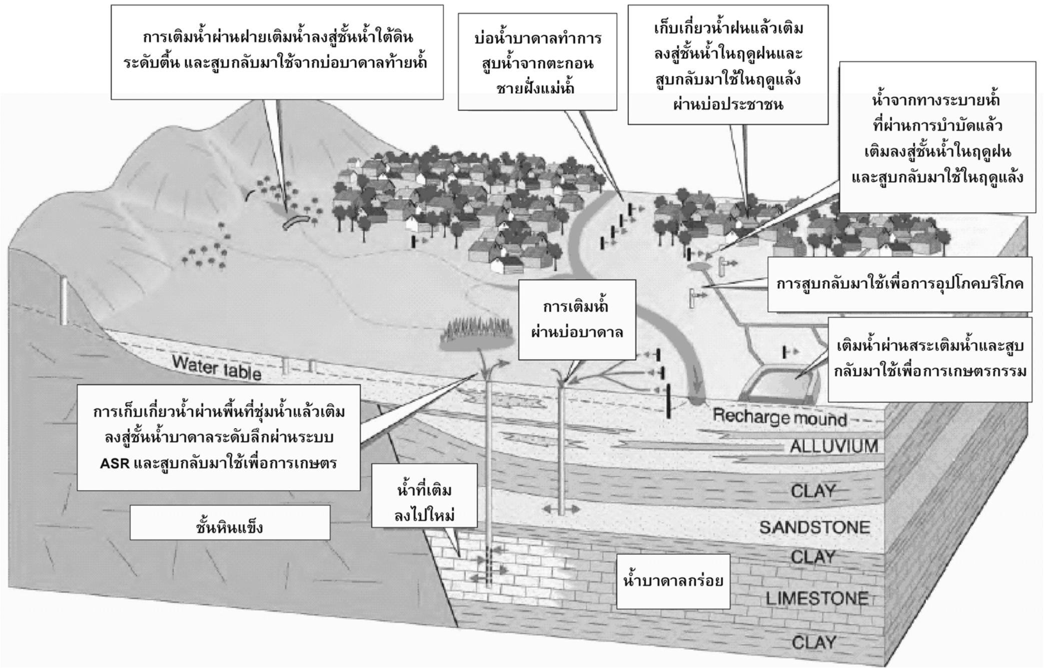
บทที่ 2
การเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล

2.1 หลักการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล

การจัดการการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Managed Aquifer Recharge, MAR) หมายถึง การจัดการให้มีการเติมน้ำลงสู่แหล่งน้ำบาดาล เพื่อรักษาระดับหรือแรงดันน้ำบาดาล เพื่อการกักเก็บและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในช่วงเวลาหรือในพื้นที่ที่ต้องการ หรือเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เช่น ป้องกันการรุกล้ำของน้ำเค็ม หรือการทรุดตัวของแผ่นดิน เป็นต้น (Dillon et al., 2009)

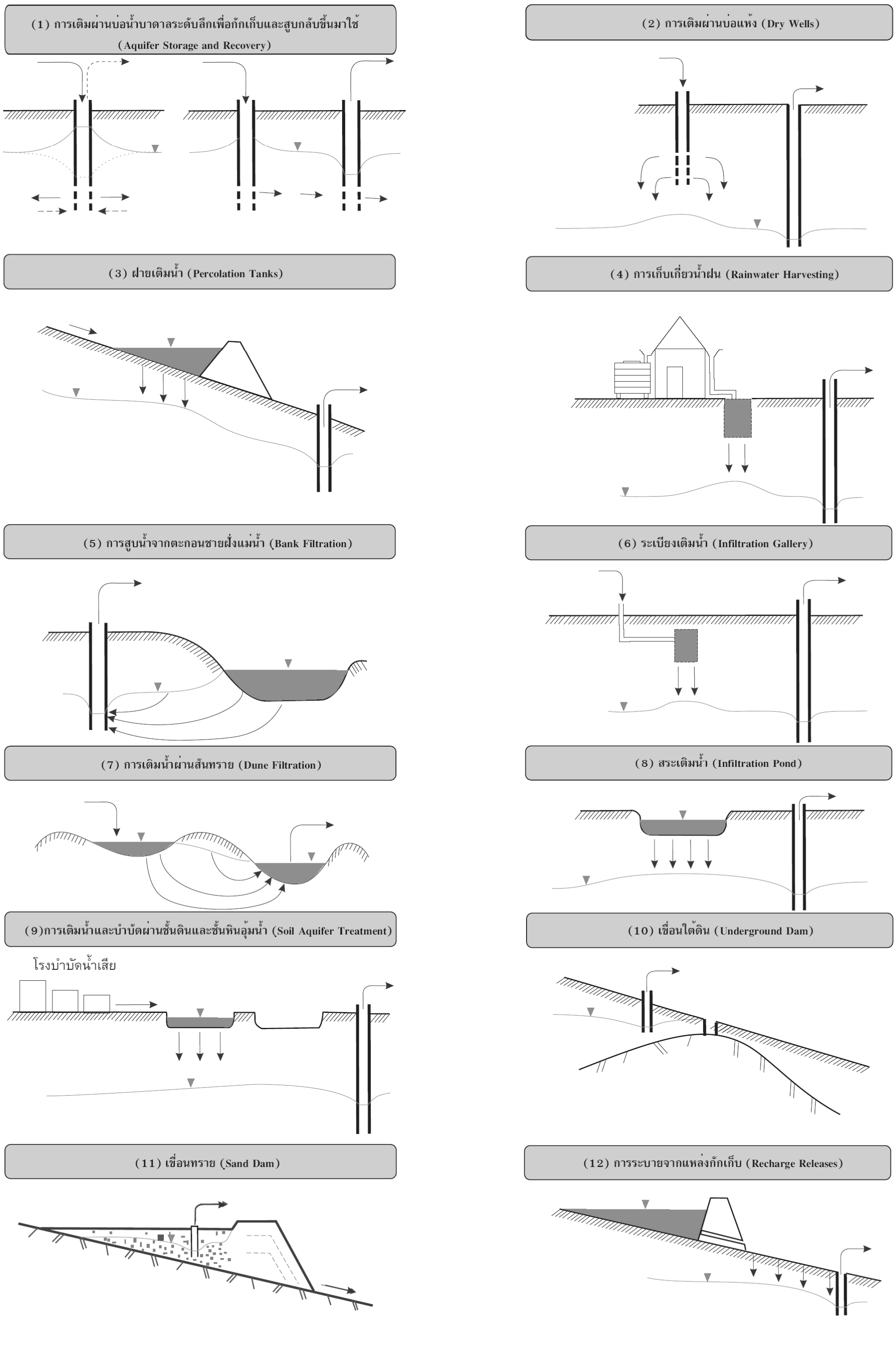
2.2 วิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล

การเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาลต้องดำเนินการตามความเหมาะสมของพื้นที่ วิธีการเติมน้ำขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นน้ำบาดาล ภูมิประเทศ การใช้ที่ดิน และปริมาณการใช้น้ำบาดาล รูปที่ 2-1 แสดงระบบการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาล แหล่งน้ำดิบ และการนำน้ำกลับขึ้นมาใช้ในพื้นที่ลุ่มน้ำ



รูปที่ 2-1 วิธีการจัดการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่ลุ่มน้ำ (ดัดแปลงจาก Dillon et al, 2009)

วิธีการเติมน้ำและการกักเก็บสู่ชั้นน้ำบาดาลที่ใช้งานในปัจจุบันแสดงในรูปที่ 2-2 ได้แก่ การเติมผ่านบ่อน้ำบาดาระดับลึกเพื่อกักเก็บและสูบกลับขึ้นมาใช้ (Aquifer Storage Recovery, ASR) การเติมน้ำผ่านสระ ระเบียงเติมน้ำ การเติมน้ำและบำบัดผ่านชั้นดินและชั้นหินอุ้มน้ำ ฝายเติมน้ำ การเก็บเกี่ยวน้ำฝน การระบายจากแหล่งกักเก็บ การเติมผ่านบ่อแห้ง การสูบน้ำกรองผ่านตะกอนฝั่งและท้องแม่น้ำ (Riverbank Filtration, RBF) การเติมน้ำผ่านสันทราย เขื่อนใต้ดิน และเขื่อนทราย เป็นต้น (Dillon, 2005)



รูปที่ 2-2 วิธีการในการจัดการการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (ดัดแปลงจาก Dillon, 2005)

2.3 แนวทางการตัดสินใจพัฒนาระบบการกักเก็บน้ำในชั้นน้ำบาดาล

การพัฒนาระบบการกักเก็บน้ำในชั้นน้ำบาดาลมีองค์ประกอบ 5 ประการที่ต้องพิจารณาเพื่อตัดสินใจดำเนินการในแต่ละโครงการ ได้แก่ ปริมาณความต้องการน้ำที่จะนำกลับมาใช้คุ้มค่ากับการลงทุนหรือไม่ มีปริมาณน้ำดิบเพียงพอต่อการนำมาเติมหรือไม่ ต้องมีชั้นน้ำบาดาลเหมาะสมต่อการนำน้ำมากักเก็บและสูบกลับมาใช้ มีพื้นที่เพียงพอที่จะเก็บเกี่ยวน้ำและบำบัดน้ำ และมีศักยภาพที่จะบริหารจัดการโครงการอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ ในประเทศออสเตรเลียที่มีการพัฒนาระบบการจัดการเติมน้ำบาดาลมายาวนาน พบว่าการกักเก็บน้ำโดยใช้ระบบการเติมน้ำบาดาลมีราคาต่อหน่วยน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับวิธีการเก็บน้ำแบบอื่นๆ เช่น เขื่อน ถังคอนกรีต หรือถังเก็บน้ำฝน เป็นต้น (Dillon et al, 2009)

2.4 การจัดการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาล

การใช้น้ำบาดาลที่เพิ่มขึ้นในหลายพื้นที่ของโลกนำมาซึ่งปัญหาการลดลงของระดับน้ำบาดาลในหลายพื้นที่ การแก้ปัญหาโดยการเติมน้ำบาดาลมีการดำเนินการอย่างแพร่หลายในหลายพื้นที่ทั่วโลก โดยเฉพาะในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 19 โดยเริ่มดำเนินการที่เมืองกลาสโกว ประเทศสกอตแลนด์ เป็นแห่งแรกในปี ค.ศ. 1810 และแพร่หลายไปทั่วโลกในช่วงต่อมา (Schmidt et al., 2007) เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา อิสราเอล อังกฤษ ออสเตรเลีย อินเดีย เยอรมัน แอฟริกาใต้ จีน เกาหลี เคนยา

การดำเนินการเติมน้ำบาดาลเริ่มต้นในปี 1871 ที่เมืองเดสมอฟน์ รัฐไอโอวา และในช่วงต้นคริสต์ศตวรรษที่ 20 มีการใช้ระบบเติมน้ำแบบท่วมเป็นผืน (spreading basin) อย่างแพร่หลายในพื้นที่ของรัฐแคลิฟอร์เนีย อริโซน่า โอเรกอน และ แคนซัส และมีการใช้ระบบ ASR และการสูบน้ำกรองผ่านตะกอนฝั่งและท้องแม่น้ำ (Riverbank Filtration, RBF) ที่ใช้บ่อน้ำบาดาลแนวนอนจำนวนมากเพื่ออนุรักษ์และเพิ่มศักยภาพของการกักเก็บน้ำ พัฒนาการของการเติมน้ำบาดาลมีหลายด้านทั้งด้านเทคนิคและกฎหมาย U.S. Geological Survey (USGS) มีส่วนร่วมอย่างมากในการพัฒนาระบบการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลของสหรัฐอเมริกาและมีส่วนร่วมในการจัดการเติมน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่อง

การเติมน้ำบาดาลในประเทศไทยเริ่มดำเนินการโดยหน่วยงานหลายหน่วยงานและได้พยายามศึกษาวิจัยเพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมกับสภาพปัญหาในหลายพื้นที่ๆ แตกต่างกัน แต่การศึกษาวิจัยยังขาดความต่อเนื่องและยังไม่มีการนำมาขยายผลสู่การปฏิบัติอย่างเป็นระบบ โครงการที่ดำเนินการศึกษาวิจัยเพื่อให้เกิดเป็นโครงการนำร่องเหล่านี้ดำเนินการในพื้นที่ที่มีการใช้น้ำบาดาลปริมาณมากเพื่อการเกษตรกรรม เช่น (1) โครงการศึกษาวิธีการที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำสำรองเพื่อการเกษตรกรรม อ.สวรรคโลก จ.สุโขทัย ดำเนินการในปี พ.ศ. 2539 - 2540 มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำสำรองให้กับการเกษตรกรรม ในพื้นที่โครงการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อการชลประทาน อ.สวรรคโลก จ.สุโขทัย (2) โครงการสำรวจออกแบบการระบายน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลพื้นที่ลุ่มน้ำแม่อาว จ.ลำพูน ดำเนินการโดยกองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณีในปี พ.ศ. 2543 (3) โครงการอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินจังหวัดพิจิตร ของกรมโยธาธิการ ดำเนินการในปี พ.ศ. 2541 มีวัตถุประสงค์เพื่อ

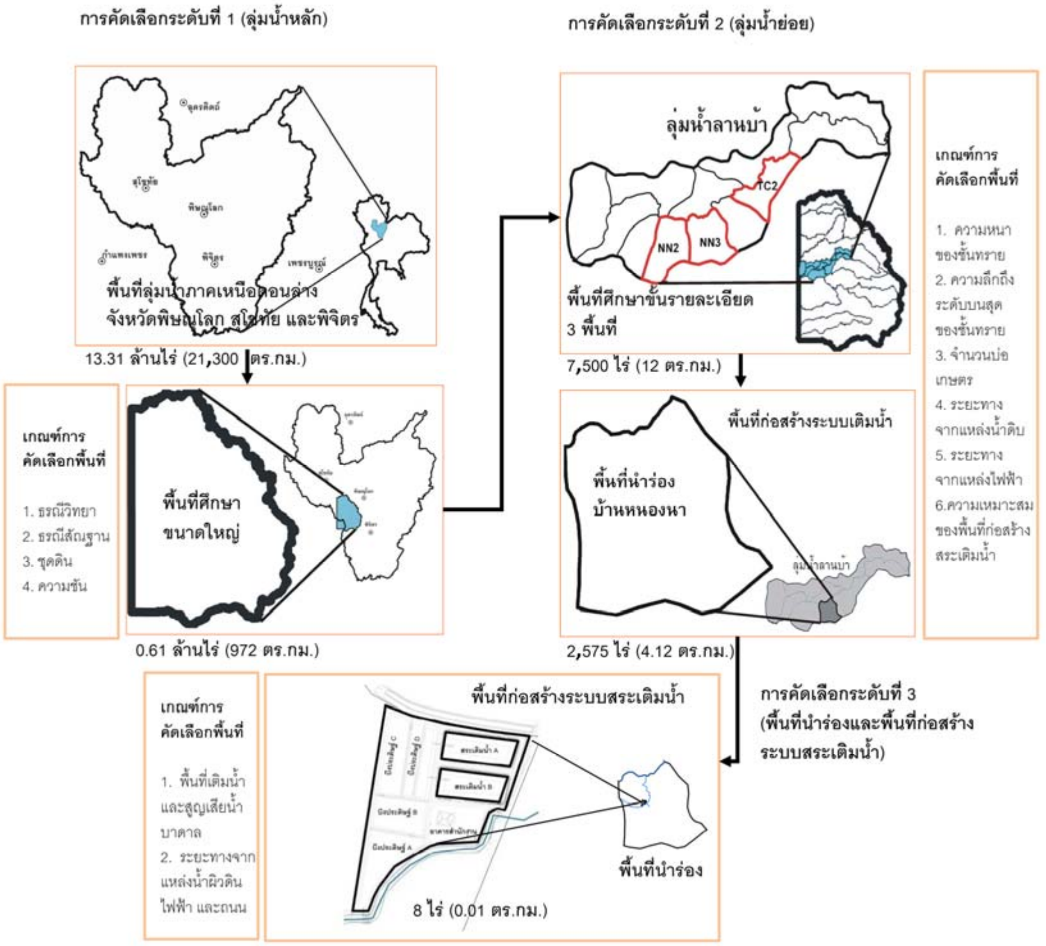
ศึกษาความเหมาะสมด้านวิศวกรรมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินที่ราบลุ่มแม่น้ำยมและแม่น้ำน่านด้านตะวันตกและตะวันออกของ จ.พิจิตร (4)โครงการอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดิน จ.สุโขทัย กรมโยธาธิการดำเนินการใน ปี พ.ศ. 2541 (5) โครงการการศึกษาทดลองเพื่ออนุรักษ์ฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดิน บริเวณ จ.กำแพงเพชร ของกรมโยธาธิการ ดำเนินการในปีพ.ศ. 2539-2541 มีพื้นที่โครงการอยู่ในที่ราบลุ่มทางทิศใต้ของอำเภอเมืองกำแพงเพชร (6) โครงการศึกษาประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ ระยะที่ 3 และการสำรวจออกแบบระบบเติมน้ำทุ่งกุลาร้องไห้ ของกองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี ดำเนินการในปี พ.ศ. 2545 และ (7) โครงการศึกษาออกแบบก่อสร้างระบบเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล พื้นที่ลุ่มแม่น้ำชายฝั่งตะวันออก ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ดำเนินการในปี พ.ศ. 2548 ซึ่งเป็นการเติมน้ำแบบ ASR และ (8) โครงการเติมน้ำลงสู่ใต้ดินโดยระบบน้ำฝน บ้านบึงกอก ต.บึงกอก อ.บางระกำ จ.พิษณุโลก และบ้านหนองหูช้าง ต.บ้านนา อ.วชิรบารมี จ.พิจิตร ดำเนินการโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ดำเนินการในปี พ.ศ. 2550

ปัจจุบันกรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้จัดทำแผนและผลิตผลงานวิจัยที่จะพัฒนาและขยายงานด้านการจัดการเติมน้ำบาดาลในประเทศไทย โดยการสร้างโครงการนำร่องเพื่อเป็นแหล่งศึกษาดูงาน กำหนดมาตรการ ผลิตคู่มือและเกณฑ์ที่จะช่วยให้การขยายโครงการด้านการเติมน้ำบาดาลเหล่านี้อย่างเป็นระบบ มีประสิทธิภาพ และมีบทบาทเป็นส่วนหนึ่งของการจัดการน้ำที่สำคัญของประเทศต่อไป

บทที่ 3
พื้นที่ศึกษา

3.1 การคัดเลือกพื้นที่ศึกษา

การคัดเลือกพื้นที่ศึกษาภายใต้โครงการศึกษาทดลองการเติมน้ำฯ แยกการคัดเลือกออกเป็นหลายระดับตั้งแต่พื้นที่ลุ่มน้ำหลักไปจนถึงพื้นที่ก่อสร้างระบบสระเติมน้ำ โดยใช้ปัจจัยหลักในการคัดเลือกแบบ Boolean (Saraf, 2004) ได้แก่ ข้อมูลด้านอุทกธรณีวิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-1 พื้นที่ศึกษาประกอบด้วย 1) พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างครอบคลุม จ.พิษณุโลก สุโขทัย และพิจิตร มีพื้นที่ประมาณ 13.31 ล้านไร่ (21,300 ตร.กม.) 2) พื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่บริเวณด้านตะวันตกของแม่น้ำยม มีพื้นที่ประมาณ 0.61 ล้านไร่ (972 ตร.กม.) 3) พื้นที่ศึกษาขั้นรายละเอียดในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองลานบ้า มีพื้นที่ประมาณ 7,500 ไร่ (12 ตร.กม.) 4) พื้นที่นำร่องบ้านหนองนา มีพื้นที่ประมาณ 2,500 ไร่ (4.12 ตร.กม.) และ 5) พื้นที่ก่อสร้างระบบเติมน้ำ มีพื้นที่ประมาณ 8 ไร่ (0.01 ตร.กม.) พื้นที่ก่อสร้างระบบเติมน้ำตั้งอยู่ในเขตพื้นที่บ้านหนองนา ม.8 ต.หนองกุลา อ.บางระกำ จ.พิษณุโลก



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการคัดเลือกพื้นที่ศึกษา

3.2 สภาพอุทกธรณีวิทยา

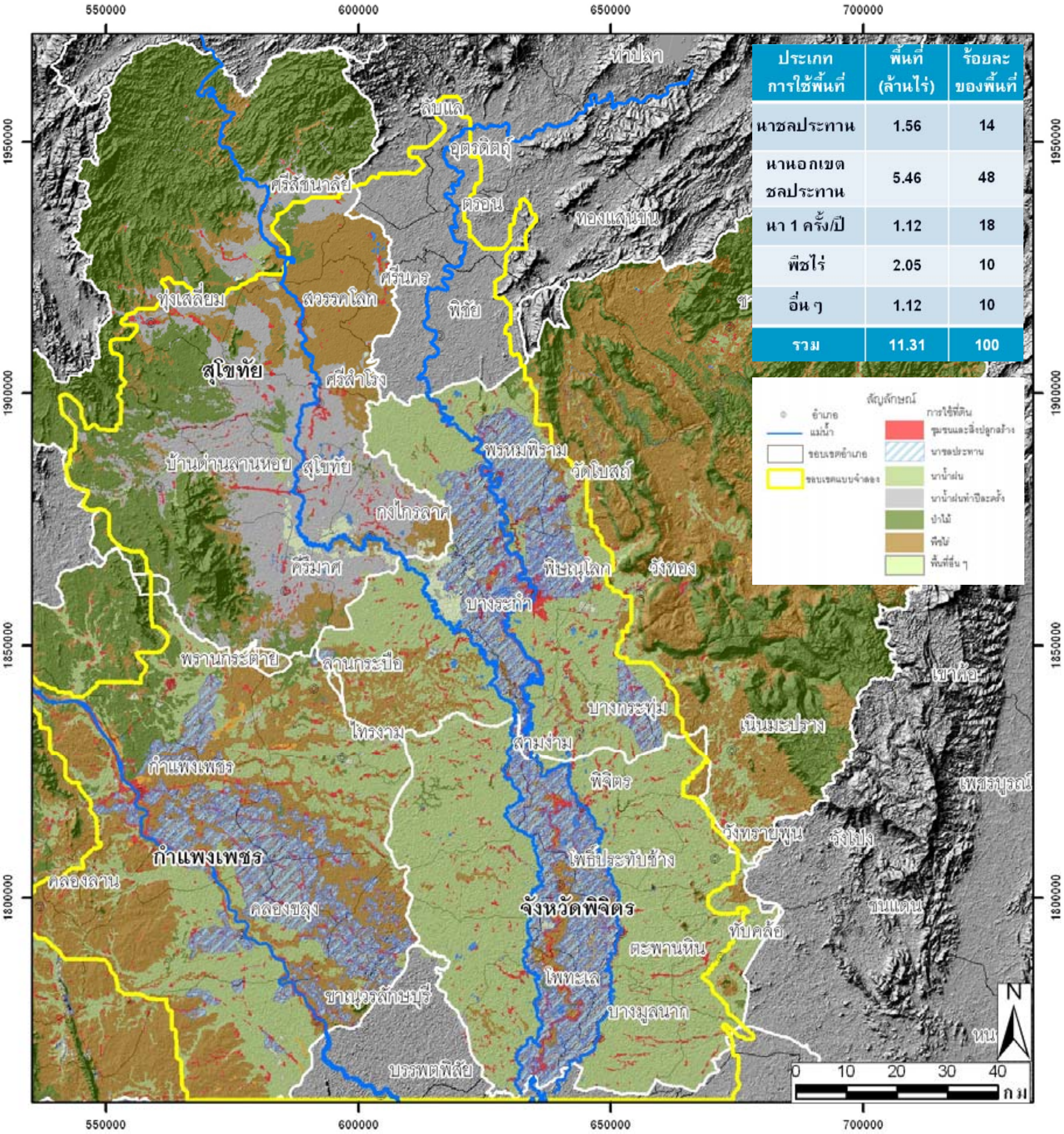
พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างตั้งอยู่บนที่ราบลุ่มแม่น้ำยมและแม่น้ำน่าน (รูปที่ 3-2) อาณาเขตด้านเหนือติดกับ จ.แพร่และอุตรดิตถ์ ด้านใต้ติดกับ จ.นครสวรรค์ ด้านตะวันออกติดกับ จ.เลยและเพชรบูรณ์ และด้านตะวันตกติดกับ จ.ลำปาง ตาก และกำแพงเพชร ภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มและมีภูเขาสูงเป็นขอบเขตด้านทิศเหนือ ทิศตะวันตก และทิศตะวันออก มีแม่น้ำยมและแม่น้ำน่านไหลผ่านจากทิศเหนือไปทิศใต้ สภาพภูมิอากาศเป็นแบบร้อนชื้น อุณหภูมิในรอบปีอยู่ระหว่าง 20-36°ซ ปริมาณน้ำฝนและการคายระเหยปีละ 1,300 และ 1,500 มม. ตามลำดับ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2553)

3.2.1 พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง

พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างรองรับด้วยหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยา 2 หน่วยหิน คือ ตะกอนหินร่วนและหินแข็ง (รูปที่ 3-3 และรูปที่ 3-4) ดังนี้ (1) ตะกอนหินร่วน พบบริเวณตอนกลางของพื้นที่ ประกอบด้วย (1.1) ตะกอนน้ำพายุคปัจจุบัน (recent flood plain deposits, Qfd หรือ Qcp) ประกอบด้วย ทรายและกรวด แทรกสลับด้วยชั้นดินเหนียว ชั้นหินอุ้มน้ำหนา 30-35 ม. ให้น้ำบาดาลประมาณ 15-25 ลบ.ม./ชม. (1.2) ตะกอนตะพักยุคใหม่ (low terrace deposits, Qlt หรือ Qcr) ประกอบด้วยดินเหนียว ทรายแป้ง แทรกสลับด้วยกรวดทราย ชั้นหินอุ้มน้ำหนาตั้งแต่ 10-60 ม. ให้น้ำบาดาลประมาณ 15-20 ลบ.ม./ชม. และ (1.3) ตะกอนตะพักน้ำยุคเก่า (high terrace deposits, Qht หรือ Qcm) ประกอบด้วยกรวด ทราย และเศษหิน สะสมตัวในพื้นที่ราบสูงเชิงเขา ชั้นหินอุ้มน้ำอยู่ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 80-100 ม. จากผิวดิน ให้น้ำบาดาลประมาณ 30-50 ลบ.ม./ชม. (2) หินแข็ง พบบริเวณด้านทิศเหนือและด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือ แหล่งน้ำบาดาลถูกกักเก็บอยู่ในรอยแตกของหิน ได้แก่ (2.1) หินปูน บางพื้นที่มีหินดินดานและหินทรายแทรกสลับ ให้น้ำบาดาลประมาณ 2-5 ลบ.ม./ชม. และ (2.2) หินแปรและหินอัคนี บริเวณที่รอยแตกของหินมีความต่อเนื่องสามารถให้น้ำบาดาลประมาณ 1-5 ลบ.ม./ชม.น้ำบาดาลระดับตื้นมีทิศทางการไหลหลักจากทิศเหนือไปทิศใต้ และไหลจากบริเวณขอบด้านตะวันตกและตะวันออกไปตอนกลางของพื้นที่ พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างมีปริมาณการใช้น้ำบาดาลเพื่ออุปโภคบริโภค อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม ประมาณปีละ 38 ล้าน ลบ.ม. 7 ล้าน ลบ.ม. และ 7,900 ล้าน ลบ.ม. ตามลำดับ

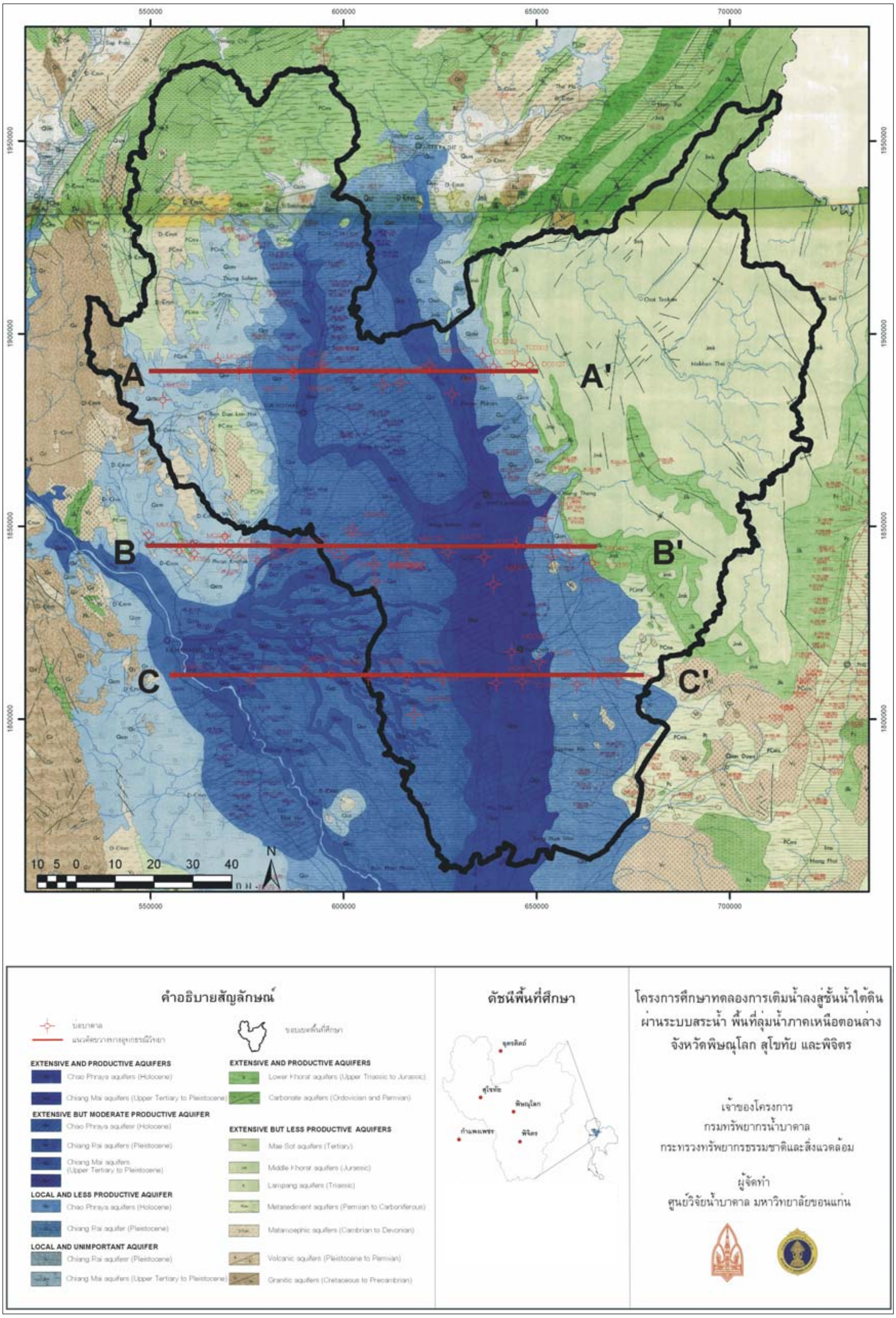
3.2.2 พื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่

พื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่ (รูปที่ 3-5 และรูปที่ 3-6) เป็นพื้นที่ราบน้ำท่วมถึงอยู่ด้านตะวันตกของแม่น้ำยมครอบคลุม อ.บางระกำ จ.พิษณุโลก อ.ชิรบารมี และอ.สามง่าม จ.พิจิตร ปริมาณการใช้น้ำบาดาลเพื่อการปลูกข้าวและอ้อย 1,624 และ 180 ลบ.ม./ไร่/ปี ตามลำดับ รวม 734 ล้าน ลบ.ม./ปี จากการศึกษาสมดุลน้ำบาดาลพบว่าน้ำบาดาลเสียสมดุล 51 ล้าน ลบ.ม./ปี หรือระดับน้ำบาดาลลดลงประมาณ 26 ซม./ปี

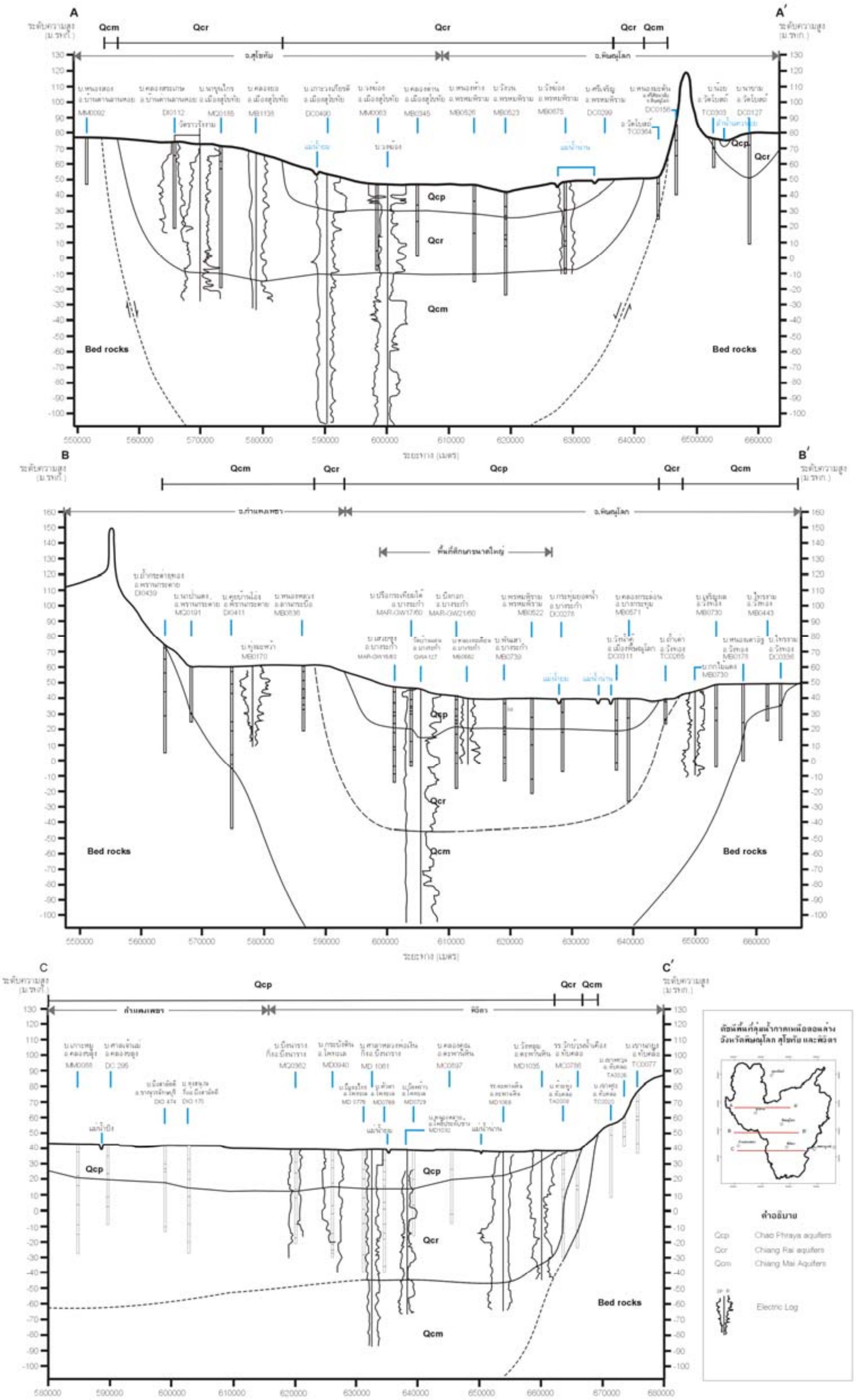


ประเภทการใช้พื้นที่	พื้นที่ (ล้านไร่)	ร้อยละของพื้นที่
นาชลประทาน	1.56	14
นานอกเขตชลประทาน	5.46	48
นา 1 ครั้ง/ปี	1.12	18
พืชไร่	2.05	10
อื่น ๆ	1.12	10
รวม	11.31	100

รูปที่ 3-2 สภาพภูมิประเทศและการใช้ประโยชน์ที่ดินพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง

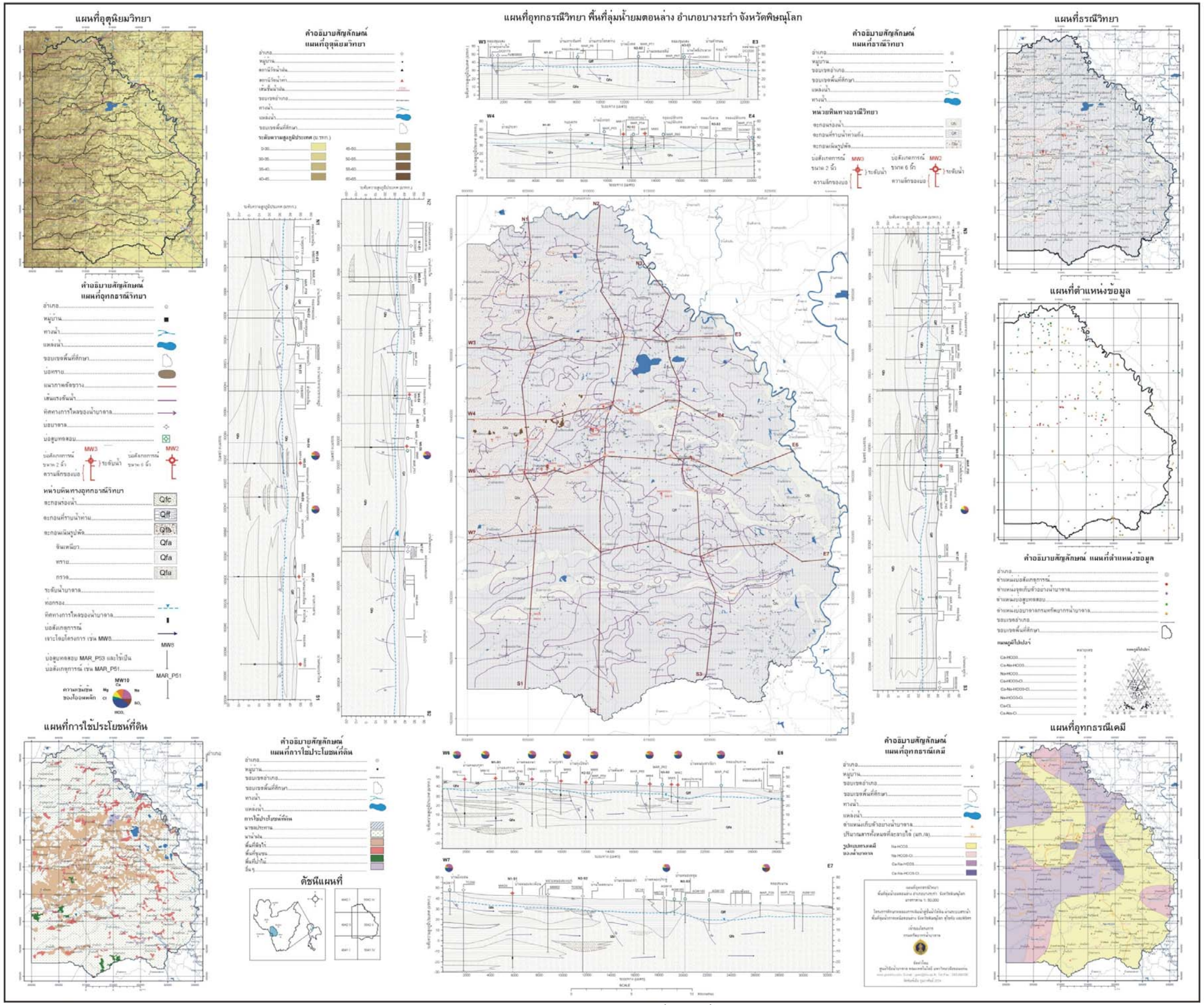


รูปที่ 3-3 แผนที่อุทกธรณีวิทยาพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง
(ดัดแปลงจาก กรมทรัพยากรธรณี, 2526)



รูปที่ 3-4 ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง

(ดัดแปลงจาก กรมทรัพยากรธรณี, 2526)



รูปที่ 3-5 แผนที่อุทกธรณีวิทยาพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนล่าง

3.2.3 พื้นที่ศึกษาขั้นรายละเอียด

พื้นที่ศึกษาขั้นรายละเอียด (รูปที่ 3-7) อยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองลานบ้า ประกอบด้วย พื้นที่บ้านหนองนา 3 (NN3) พื้นที่บ้านทุ่งชา 2 (TC2) และพื้นที่บ้านหนองนา 2 (NN2) มีเนื้อที่รวม 12 ตร.กม. พื้นที่บ้านหนองนา 3 เป็นพื้นที่ศึกษานำร่องที่มีความเหมาะสมมากที่สุดเมื่อพิจารณาจากความหนาของชั้นดินเหนียวที่ปิดทับด้านบน ความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้น ความหนาแน่นของบ่อบาดาลเพื่อการเกษตร ระยะทางจากแหล่งน้ำดิบ แนวสายส่งไฟฟ้า เป็นต้น

3.2.4 พื้นที่นำร่องบ้านหนองนา

พื้นที่นำร่องบ้านหนองนามีแหล่งน้ำผิวดินสำคัญ ได้แก่ (1) คลองลานบ้า บริเวณตอนบนของพื้นที่ซึ่งน้ำไหลจากด้านตะวันตกไปตะวันออก และ (2) คลองระบายน้ำซึ่งไหลผ่านบริเวณตอนกลางของพื้นที่และไหลลงสู่คลองลานบ้าด้านทิศเหนือ เป็นคลองที่ใช้ระบายน้ำจากนาข้าวในฤดูฝนและระบายน้ำบาดาลที่สูบมาเพื่อเตรียมแปลงในฤดูแล้ง คลองระบายน้ำเป็นแหล่งน้ำดิบที่มีศักยภาพสูงสำหรับการเติมน้ำผ่านระบบสระเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาล น้ำที่ไหลผ่านคลองคำนวณโดยวิธี Rational จากข้อมูลความเข้มฝนรายเดือนและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำที่สัมพันธ์กับฝนรายเดือนในลุ่มน้ำยมตอนล่าง (กรมชลประทาน, 2546) มีปริมาณปีละ 751,300 ลบ.ม. เฉพาะในช่วงฤดูฝน (กรกฎาคม-ตุลาคม) มีปริมาณสูงถึง 550,000 ลบ.ม. ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำผิวดินในพื้นที่นำร่องทั้งในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝนพบว่าน้ำผิวดินมีคุณภาพดี ไม่พบการปนเปื้อนจากปุ๋ย สารป้องกันและกำจัดศัตรูพืช ความขุ่นตั้งแต่ 6-460 NTU แมงกานีส 4.9-8.4 มก./ล. รูปแบบทางเคมีเป็น $Na\text{-}HCO_3$

พื้นที่นำร่องบ้านหนองนามีการเจาะบ่อน้ำบาดาลระดับตื้นเพื่อใช้สำหรับปลูกข้าวและอ้อยประมาณ 100 บ่อ ในช่วงฤดูแล้งมีการใช้น้ำบาดาลสูงถึง 1.26 ล้าน ลบ.ม. (ตารางที่ 3-1) เกษตรกรส่วนใหญ่ทรุดบ่อลงไปที่ความลึก 4-6 ม.

คณะที่ปรึกษาได้ติดตั้งบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่นำร่องตามทิศทางการไหลหลักของน้ำบาดาล รวม 47 บ่อ เป็นบ่อระดับตื้นซึ่งมีความลึกน้อยกว่า 15 ม. จำนวน 32 บ่อ (บ่อ 6 นิ้ว จำนวน 30 บ่อ และบ่อ 2 นิ้ว จำนวน 2 บ่อ) และบ่อระดับลึกกว่า 15 ม. จำนวน 15 บ่อ (บ่อ 6 นิ้ว จำนวน 1 บ่อ และบ่อ 2 นิ้ว จำนวน 14 บ่อ) จากการศึกษาทางอุทกธรณีวิทยาพบว่าพื้นที่ดังกล่าวมีชั้นดินเหนียวปิดทับด้านบนหนา 0-4 ม. (รูปที่ 3-8 และ 3-9) ชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้นเป็นชั้นกรวดทรายและทรายแป้ง หนา 10-15 ม. คั่นด้วยชั้นดินเหนียวหนา 2-5 ม. ถัดลงไปเป็นชั้นหินอุ้มน้ำทรายหยาบที่ความลึก 15-20 ม. จากผิวดิน ชั้นหินอุ้มน้ำมีคุณสมบัติเป็น Heterogeneous and anisotropic จากการวิเคราะห์ข้อมูลสูบทดสอบพบว่าชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้นมีค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำในช่วง 2,100 ถึง 3,370 ตร.ม./วัน (T_x=4,990 ตร.ม./วัน และ T_y=6,250 ตร.ม./วัน) ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน 2.43×10^{-3} – 3.90×10^{-3} ม./วินาที และมีค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ 0.001 ถึง 0.090 ส่วนชั้นหินอุ้มน้ำระดับลึกมีค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ 30 ถึง 150 ตร.ม./วัน (T_x=-90 ตร.ม./วัน และ T_y=-200 ตร.ม./วัน) และมีค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ 0.001 ถึง 0.040

น้ำบาดาลมีทิศทางการไหลหลักจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือ พื้นที่เติมน้ำบาดาลตามธรรมชาติอยู่บริเวณพื้นที่เนินด้านทิศใต้หรือบริเวณบ้านหนองนาซึ่งมีปริมาณการเติมน้ำร้อยละ 6-21

ของปริมาณน้ำฝน ปัจจุบันระดับน้ำบาดาลอยู่ที่ระดับลึก 7-8 ม.จากผิวดิน คุณภาพของน้ำบาดาลอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้ในการบริโภค ยกเว้นเหล็กมีค่ามากกว่า 1.0 มก./ล. คุณภาพน้ำบาดาลเพื่อการเกษตรอยู่ในเกณฑ์ดีเยี่ยม (Sodium Absortion Ration, SAR < 10) รูปแบบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ HCO_3

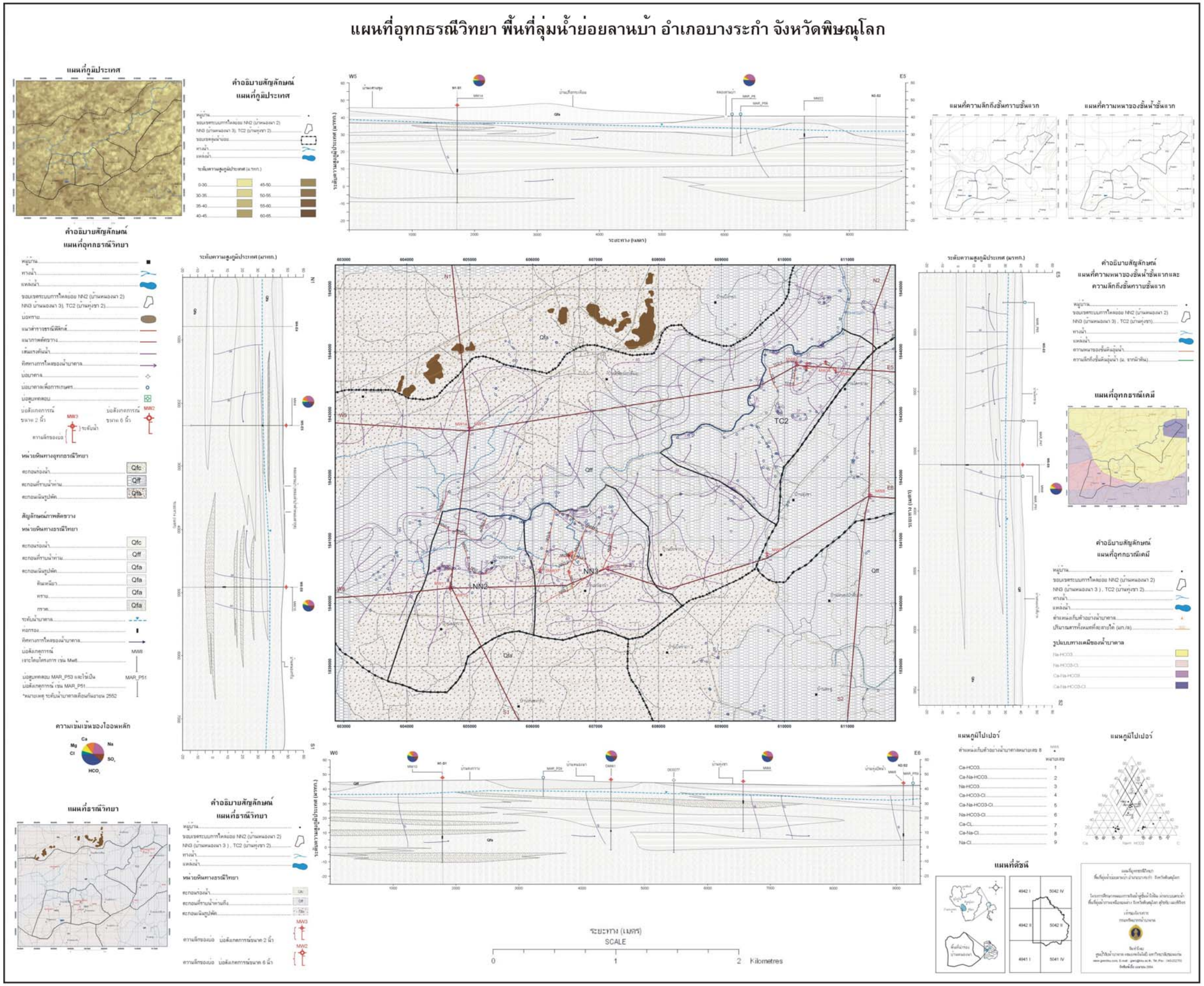
ตารางที่ 3-1 สัดส่วนการใช้น้ำเพื่อการเกษตรพื้นที่นำร่องบ้านหนองนา

กิจกรรมการใช้น้ำ	ฤดูฝน ล้าน ลบ.ม. (%)			ฤดูแล้ง ล้าน ลบ.ม. (%)		
	น้ำฝนและน้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม	น้ำฝนและน้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม
นาข้าว	1.53 (90)	0.17 (10)	1.87 (100)	0.69 (40)	1.03 (60)	2.13 (100)
ไร่อ้อย	1.07 (100)	-	1.07 (100)	0.02 (10)	0.23 (90)	0.23 (100)
รวม	2.60	0.17	2.94	0.71	1.26	2.36

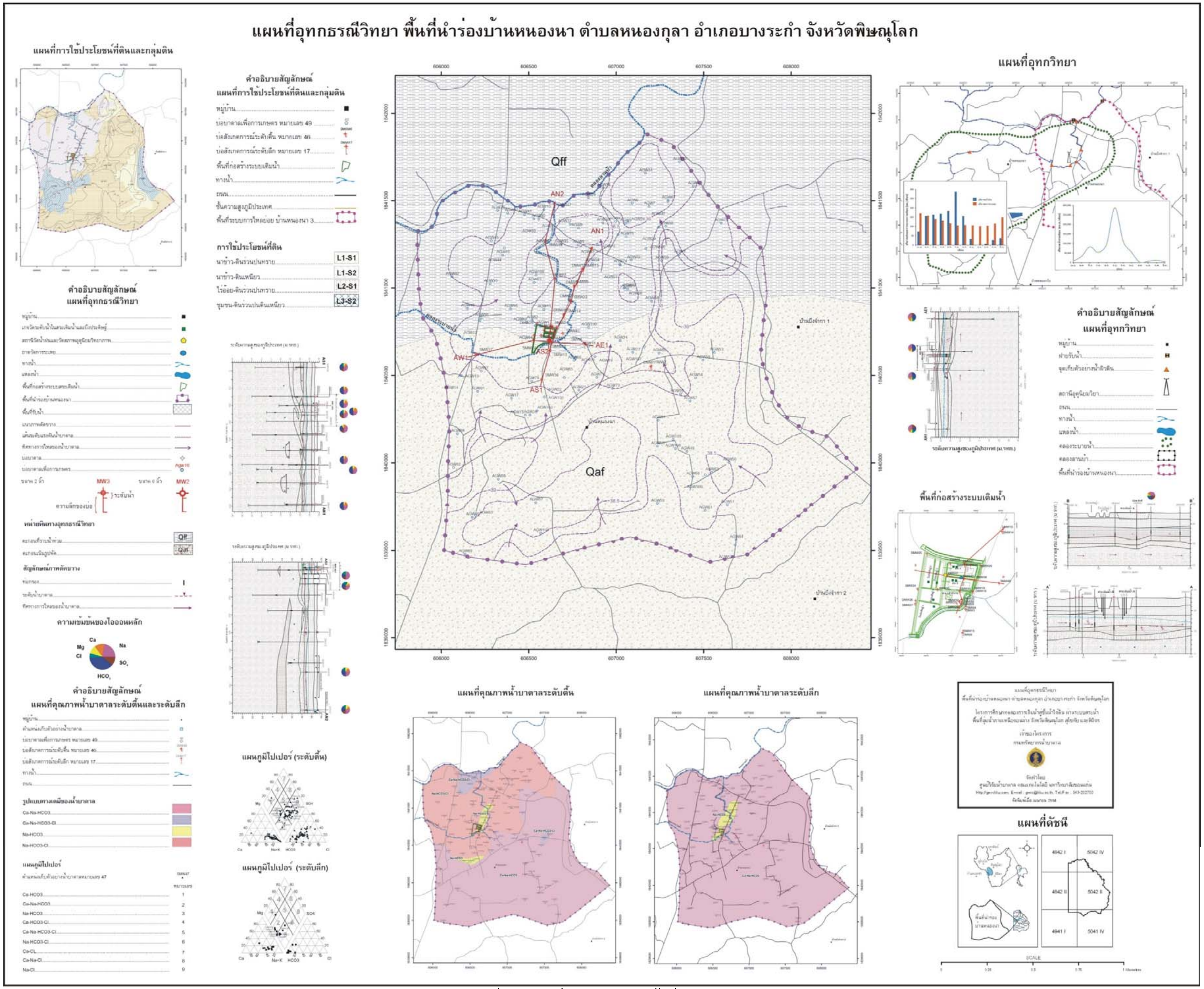
3.2.5 พื้นที่ก่อสร้างระบบสระเติมน้ำ

พื้นที่ก่อสร้างระบบสระเติมน้ำเป็นพื้นที่เช่าดำเนินการเป็นระยะเวลา 5 ปี (ตุลาคม 2552 ถึงตุลาคม 2557) ตั้งอยู่บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่นำร่องและอยู่ติดกับคลองระบายน้ำ พื้นที่ก่อสร้างประกอบด้วยอาคารสำนักงาน บึงประดิษฐ์จำนวน 4 บึง และสระเติมน้ำจำนวน 2 สระ (ดังแสดงในรูปที่ 3-1 รูปที่ 3-11 รายละเอียดเพิ่มเติมดูบทที่ 4) พื้นที่ได้รับประโยชน์จากการเติมน้ำผ่านสระเป็นพื้นที่นาข้าวบริเวณโดยรอบและบริเวณทิศเหนือของพื้นที่ก่อสร้าง

พื้นที่ก่อสร้างรองรับด้วยชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้นซึ่งเป็นตะกอนทรายขนาดละเอียดถึงหยาบ มีความหนา 12-15 ม. คั่นด้วยดินเหนียวหนา 1-5 ม. ส่วนชั้นหินอุ้มน้ำระดับลึกเป็นตะกอนทรายขนาดปานกลางถึงหยาบ และกรวดแทรกสลับด้วยดินเหนียว น้ำบาดาลมีทิศทางการไหลหลักจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ไปยังทิศตะวันออกเฉียงเหนือ แรงดันน้ำบาดาลมีค่าอยู่ระหว่าง 36 - 37 ม.รทก. ดังแสดงในรูปที่ 3-10 และรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-6 แผนที่อุทกธรณีวิทยาพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยลานบ้า



รูปที่ 3-7 แผนที่อุทกธรณีวิทยาพื้นที่นำร่องบ้านหนองนา

3.3 การจำลองการไหลของน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์

3.3.1 วัตถุประสงค์การจำลอง

การจำลองการไหลของน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์พื้นที่นำร่องบ้านหนองนาและพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการไหลและสมดุลน้ำบาดาลในสภาพธรรมชาติ การคาดคะเนผลจากการทดลองเติมน้ำ (บทที่ 4) และการประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาล (บทที่ 5) โดยใช้โปรแกรม Visual MODFLOW 4.3 แผนการจำลองประกอบด้วย (1) กรณีเฮดคงตัว (steady state) (2) กรณีเฮดเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในระยะเวลา 1 ปี (3) กรณีจำลองเพื่อคาดคะเนรูปแบบการไหลและสมดุลน้ำ ในระยะเวลา 10 ปี โดยใช้ข้อมูลอัตราการเพิ่มเติมน้ำจากน้ำฝน แหล่งน้ำผิวดิน ปริมาณการสูบน้ำบาดาลเพื่อการเกษตร คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำ แรงดันน้ำบาดาลหรือเฮดเริ่มต้น และจัดทำเป็นแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง

ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง	พื้นที่นำร่องบ้านหนองนา	พื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่
อัตราการเพิ่มเติมน้ำจากน้ำฝน	ร้อยละ 6-21 ของปริมาณน้ำฝน	ร้อยละ 5-55 ของปริมาณน้ำฝน
แหล่งน้ำผิวดิน	กำหนดให้คลองลานบ้ามีความกว้าง 20 ม. เท่ากันตลอดสาย ความหนาของตะกอนท้องน้ำ 1 ม. ระดับน้ำและท้องน้ำประเมินจากข้อมูลสนาม กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน 1.0×10^{-8} ม./วินาที	กำหนดให้แม่น้ำยมมีความกว้าง 40 ม.เท่ากันตลอดสาย ความหนาของตะกอนท้องน้ำ 1 ม. กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน 1.0×10^{-8} ม./วินาที
ปริมาณการสูบน้ำบาดาลเพื่อการเกษตร	การใช้น้ำบาดาลเพื่อปลูกข้าวในฤดูแล้งและฤดูฝน 1,520 ลบ.ม./ไร่ และ104 ลบ.ม./ไร่ ตามลำดับ รวมเป็น 1,624 ลบ.ม./ไร่/ปี การใช้น้ำบาดาลเพื่อปลูกอ้อย 180 ลบ.ม./ไร่/ปี กำหนดให้บ่อบาดาลสำหรับการทำนาข้าว มีการสูบใช้น้ำ 64 ลบ.ม./วัน ในช่วงฤดูแล้ง และ 5 ลบ.ม./วัน ในช่วงฤดูฝน ส่วนบ่อบาดาลที่ใช้สำหรับทำไร่อ้อย ใช้น้ำเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง 35 ลบ.ม./วัน	การใช้น้ำบาดาลเพื่อปลูกข้าวในฤดูแล้งและฤดูฝน 1,520 ลบ.ม./ไร่ และ104 ลบ.ม./ไร่ ตามลำดับ รวมเป็น 1,624 ลบ.ม./ไร่/ปี การใช้น้ำบาดาลเพื่อปลูกอ้อย 180 ลบ.ม./ไร่/ปี กำหนดให้บ่อบาดาลสำหรับการทำนาข้าว มีการสูบใช้น้ำ 210 ลบ.ม./วัน ในช่วงฤดูแล้ง และ 17 ลบ.ม./วัน ในช่วงฤดูฝน ส่วนบ่อบาดาลที่ใช้สำหรับทำไร่อ้อย ใช้น้ำเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง 35 ลบ.ม./วัน
คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำ	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวราบมีค่าอยู่ในช่วง 2.24×10^{-3}-3.36×10^{-3} ม./วินาที และมีค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ 0.001-0.090 อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวดิ่งและแนวราบ (K_v : K_h) เป็น 1:10	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวราบมีค่าอยู่ในช่วง 1.10×10^{-4}-4.25×10^{-3} ม./วินาที ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บมีค่าอยู่ในช่วง 2.71×10^{-4}-5.92×10^{-2} อัตราส่วนระหว่าง K_v : K_h เป็น 1:10
แรงดันน้ำบาดาลหรือเฮดเริ่มต้น	ข้อมูลเดือนธันวาคม 2552 จากบ่อบาดาล 65 บ่อ มีค่าแรงดันน้ำบาดาล 35.5 - 40 ม.รทก.	ข้อมูลเดือนกันยายน 2552 จากบ่อบาดาล 25 บ่อ มีค่าแรงดันน้ำบาดาล 30 - 41 ม.รทก.

3.3.2 การปรับเทียบค่าพารามิเตอร์

การปรับเทียบค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ชุดข้อมูลในแบบจำลองที่มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ โดยปรับค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและค่าสัมประสิทธิการกักเก็บน้ำให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงทีละชุดจนระดับน้ำบาดาลที่วัดในสนามและจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน และรูปแบบการไหลของน้ำบาดาลที่ได้จากการจำลองคล้ายคลึงกับแบบจำลองเชิงมโนทัศน์

ผลการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองพื้นที่นำร่องพบว่า ได้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้นและลึกเท่ากับ $9x10^{-5}$ ม./วินาที และ $2.5x10^{-4}$ ม./วินาที ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้นและลึกเท่ากับ 0.22 และ 0.12 ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (root mean squared residual, RMS) ของระดับน้ำบาดาลที่วัดในสนามและจากการจำลองมีค่า 0.31 ม. ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

ส่วนผลการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่พบว่า ได้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้นและลึกเท่ากับ $1.8x10^{-4}$ ม./วินาที และ $2.0x10^{-4}$ ม./วินาที ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำทั้งระดับตื้นและลึกมีค่าเท่ากับ 0.20 มีค่า RMS เท่ากับ 0.893 ม. ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

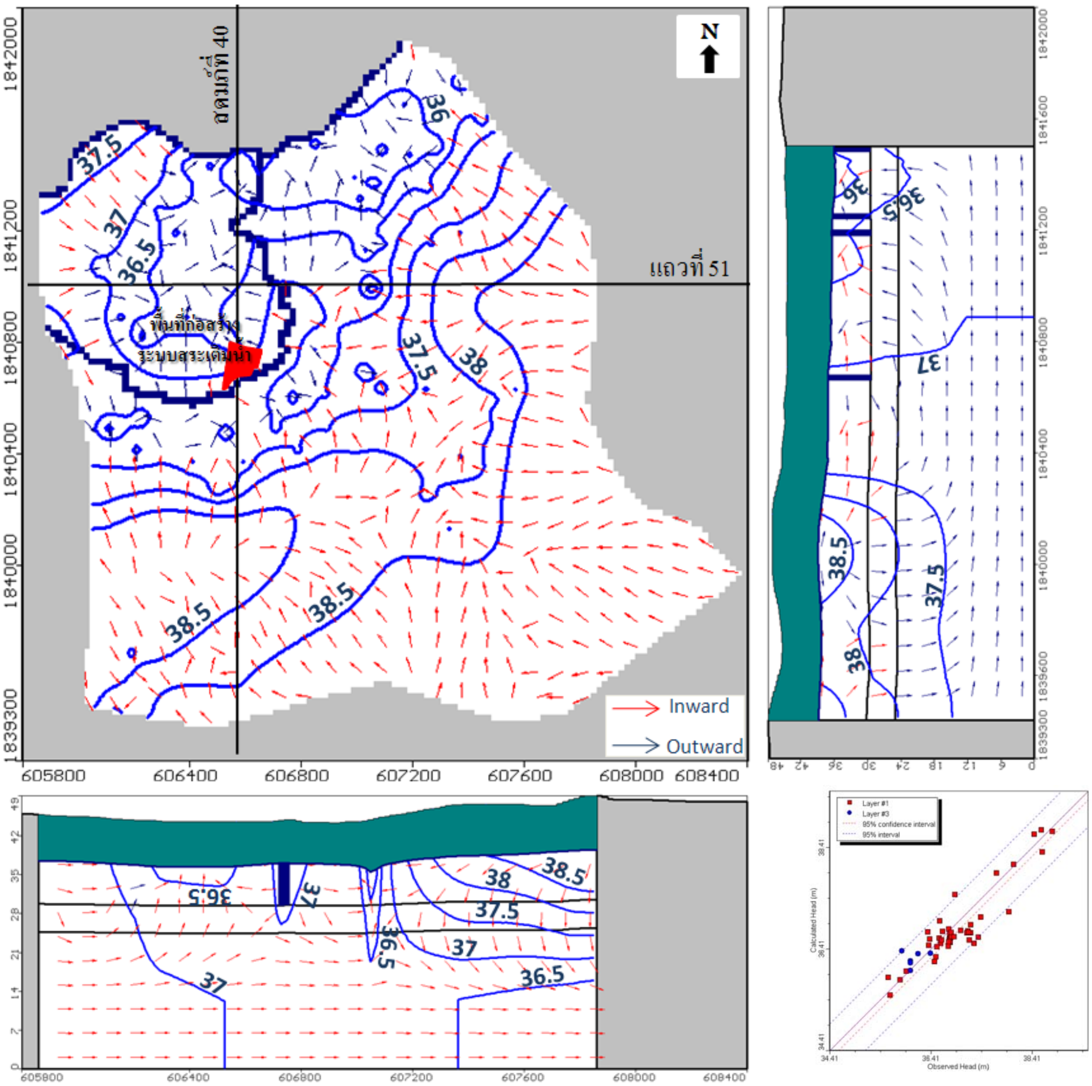
3.3.3 การทดสอบความอ่อนไหวของตัวแปร

การทดสอบความอ่อนไหวของตัวแปรเป็นการกำหนดค่าสัมประสิทธ์การยอมให้น้ำซึมผ่านทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ และอัตราการเติมน้ำ ให้มีค่า 5 เท่า 10 เท่า 1/5 เท่า และ 1/10 เท่า ของค่าที่ปรับเทียบ แล้วคำนวณการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำที่เกิดขึ้น ผลการทดสอบพบว่าตัวแปรที่มีความอ่อนไหวเรียงลำดับจากมากที่สุดไปน้อยที่สุด ดังนี้ อัตราการเติมน้ำ ค่าสัมประสิทธ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวดิ่ง ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ และค่าสัมประสิทธ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวราบ

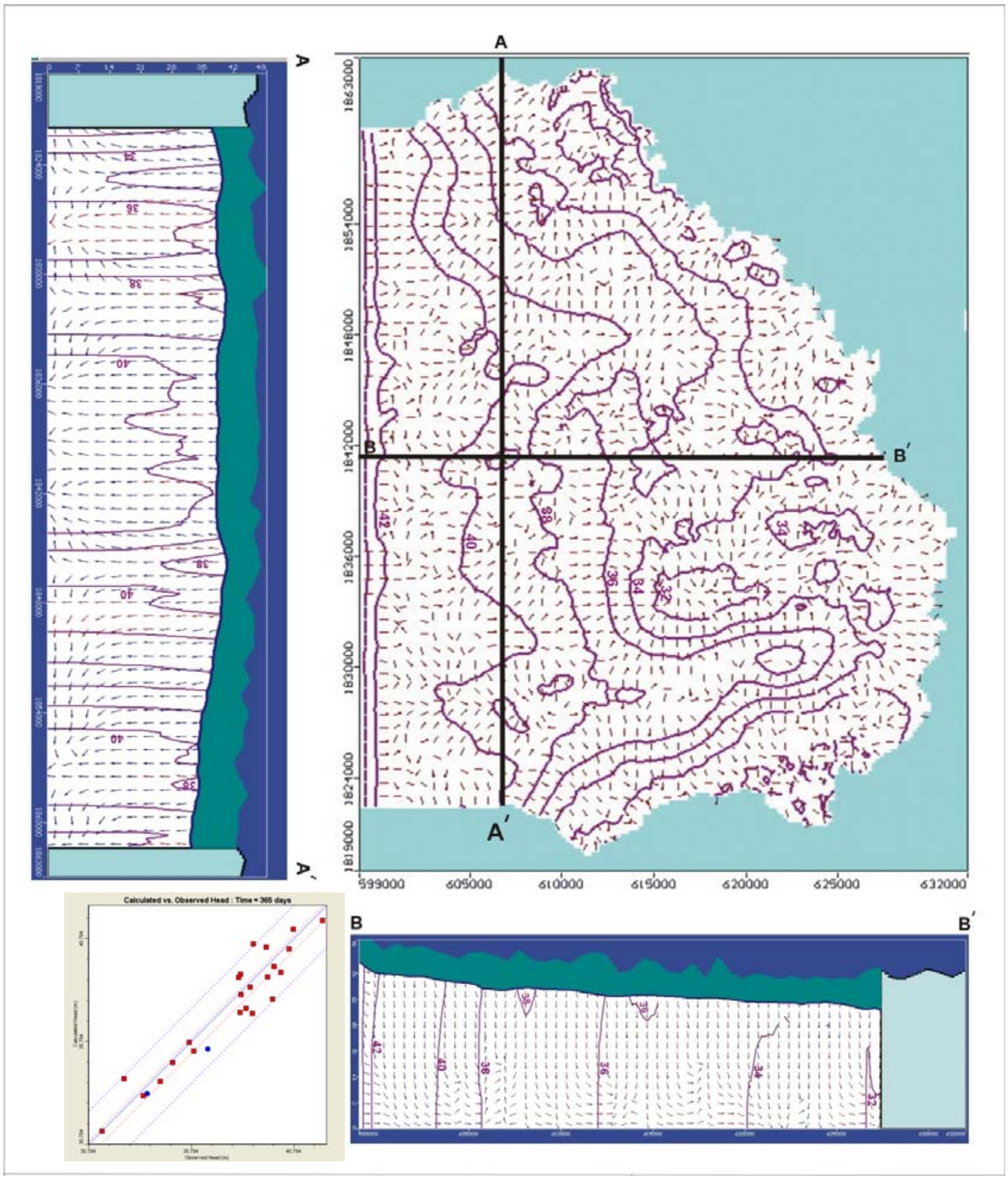
3.3.4 ผลการจำลอง

ผลการจำลองการไหลของน้ำบาดาลเชิงคณิตศาสตร์พบว่า น้ำบาดาลในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนามีทิศทางการไหลหลักจากพื้นที่เนินด้านทิศใต้ไปยังด้านทิศเหนือ การสูบใช้น้ำบาดาลในพื้นที่มากเกินสมดุลทำให้เกิดกรวยน้ำลดบริเวณทิศเหนือของพื้นที่ (รูปที่ 3-8) สมดุลน้ำบาดาลในรอบหนึ่งปี (พ.ศ. 2553) พบว่า มีปริมาณน้ำบาดาลที่ไหลเข้าและไหลออกจากระบบประมาณ 1.34 ล้าน ลบ.ม. และ 1.57 ล้าน ลบ.ม. ตามลำดับ เฉพาะปริมาณการสูบใช้น้ำบาดาลระดับตื้นประมาณ 1.40 ล้าน ลบ.ม. ระบบน้ำบาดาลขาดดุล 0.23 ล้าน ลบ.ม. ระดับน้ำบาดาลลดลงปีละ 25 ซม.

ส่วนน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่มีทิศทางการไหลจากพื้นที่เนินด้านทิศตะวันตกไปยังด้านทิศตะวันออก เกิดกรวยน้ำลดบริเวณตอนกลางและทิศตะวันออกของพื้นที่ (รูปที่ 3-9) สมดุลน้ำบาดาลในรอบหนึ่งปี (พ.ศ. 2543) พบว่า มีปริมาณน้ำบาดาลที่ไหลเข้าและไหลออกจากระบบประมาณ 223 ล้าน ลบ.ม. และ 273 ล้าน ลบ.ม. ตามลำดับ เฉพาะปริมาณการสูบใช้น้ำบาดาลระดับตื้นประมาณ 272 ล้าน ลบ.ม. ระบบน้ำบาดาลขาดดุล 51 ล้าน ลบ.ม. ระดับน้ำบาดาลลดลงปีละ 26 ซม.



รูปที่ 3-8 ผลการจำลองทิศทางการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนา



รูปที่ 3-9 ผลการจำลองทิศทางการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่

3.4 สาระสำคัญ

พื้นที่ศึกษาสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 พื้นได้แก่ 1) พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง จ.พิษณุโลก สุโขทัย พิจิตร และบางส่วนของ จ.กำแพงเพชร 2) พื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่บริเวณด้านตะวันตกของแม่น้ำยม 3) พื้นที่ศึกษาขั้นรายละเอียดในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองลานบ้า 4) พื้นที่นำร่องบ้านหนองนา และ 5) พื้นที่ก่อสร้างระบบสระเติมน้ำ ซึ่งตั้งอยู่ในบ้านหนองนา ต.หนองกุลา อ.บางระกำ จ.พิษณุโลก พื้นที่ศึกษาทั้งหมดได้นำเสนอในรูปแบบแผนที่และภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาของชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้น สำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนล่างและพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยลานบ้าได้จัดทำเป็นแผนที่อุทกธรณีวิทยามาตราส่วน 1:50,000 และมาตราส่วน 1:10,000 ตามลำดับ

พื้นที่นำร่องบ้านหนองนาเป็นพื้นที่เหมาะสมในการก่อสร้างระบบสระเติมน้ำตามวิธีการคัดเลือกแบบ Boolean (Saraf, 2004) เนื่องจากมีความเหมาะสมมากที่สุดด้านอุทกธรณีวิทยา ได้แก่ ดินเหนียวหรือดินถมมีขนาดบางน้อยกว่า 3 ม. ชั้นกรวดทรายระดับตื้นมีความหนาและต่อเนื่องประมาณ 10-15 ม. จำนวนบ่อเกษตรประมาณ 100 บ่อ รวมทั้งมีความเหมาะสมด้านระยะทางจากแหล่งน้ำดิบ ไฟฟ้า ถนน และได้รับความร่วมมือจากประชาชนและหน่วยงานในท้องถิ่น

ผลการศึกษาสมดุลของน้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์น้ำบาดาลในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนาและพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่ในปัจจุบัน (พ.ศ. 2553) ซึ่งพบว่า ระบบน้ำบาดาลขาดดุล 0.23 ล้าน ลบ.ม. และ 51 ล้าน ลบ.ม. ทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลงปีละ 25 ซม. และ 26 ซม.ตามลำดับ ภายใน 20 ปีข้างหน้าหากไม่มีการเพิ่มเติมน้ำหรือลดปริมาณการใช้น้ำบาดาลชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้นอาจเสียหายอย่างถาวร

บทที่ 4
การทดลองเติมน้ำ การประเมินผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

การออกแบบและการทดลองเติมน้ำ ประกอบด้วยขั้นตอนการศึกษาดังนี้ การออกแบบและก่อสร้าง การทดสอบระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ การทดลองเติมน้ำผ่านสระ (ขนาดเล็กและใหญ่) การติดตามผลกระทบด้านระดับและคุณภาพน้ำบาดาล การจัดการและบำรุงรักษาระบบเติมน้ำผ่านสระ และการประเมินผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

4.1 การออกแบบและก่อสร้างระบบเติมน้ำ

4.1.1 การออกแบบระบบเติมน้ำ

แนวคิดในการออกแบบต้องไม่ยุ่งยากและสะดวกในการปฏิบัติ ใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมและสามารถขยายขนาดโครงการในอนาคตได้ประกอบด้วย การออกแบบระบบผันน้ำ ระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สระเติมน้ำ อาคารสำนักงาน ระบบตรวจวัดอัตราการเติมน้ำ และระบบประเมินผลการเติมน้ำ

4.1.2 การก่อสร้างระบบเติมน้ำ

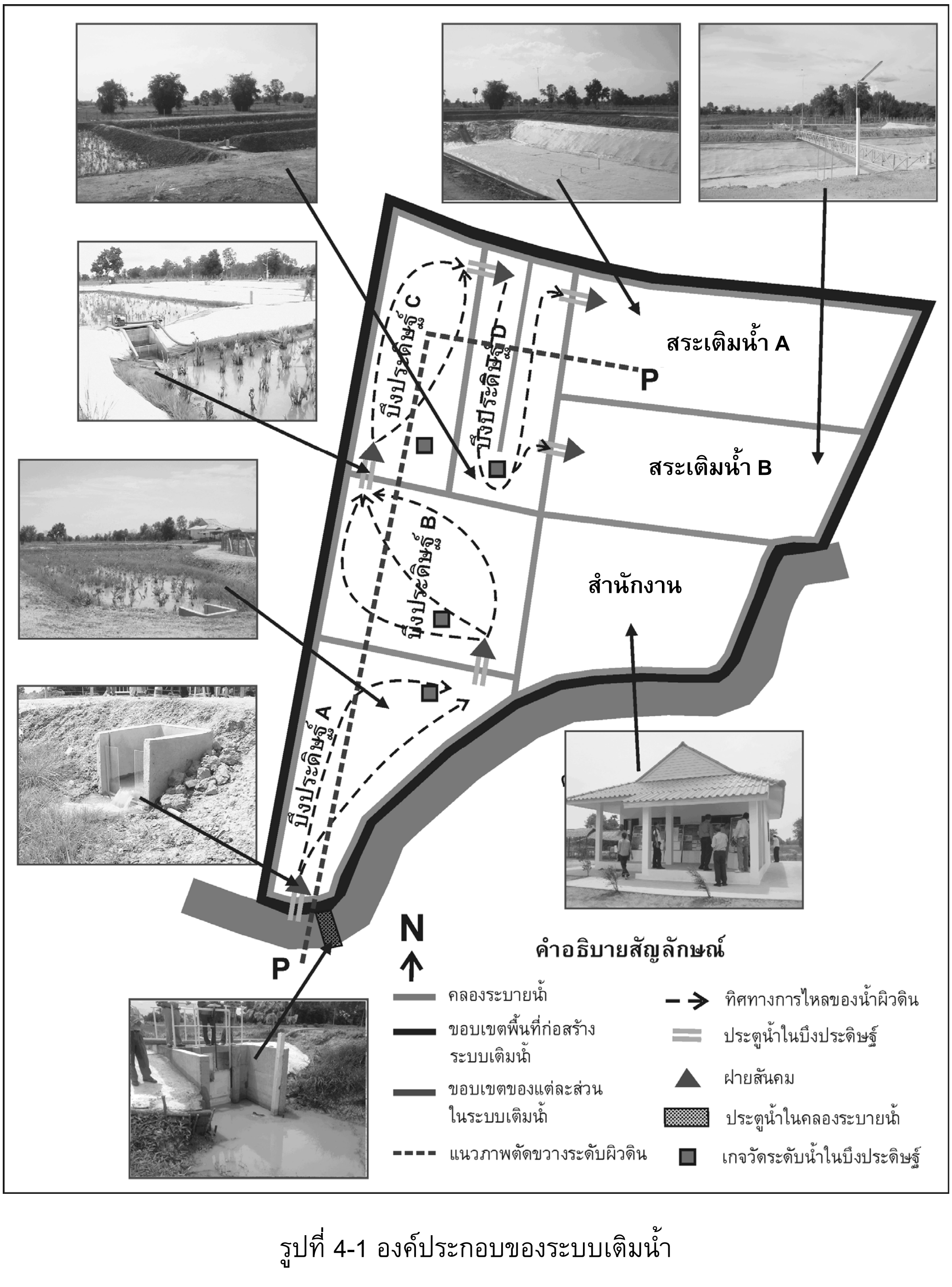
องค์ประกอบของระบบเติมน้ำ ได้แก่ ระบบผันน้ำดิบ ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ อาคารและระบบควบคุม และระบบวัดอัตราการเติมน้ำ ใช้เวลาก่อสร้าง 60 วัน

1) ระบบผันน้ำดิบ ประกอบด้วย ฝายคอนกรีตที่สามารถยกระดับน้ำได้สูงสุด 1.5 ม. ควบคุมด้วยประตูน้ำ ผันน้ำเข้าระบบผ่านท่อลอดด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งติดตั้งฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อวัดอัตราการไหลได้ในช่วง 1-200 ลบ.ม./ชม.

2) ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบด้วยบึงประดิษฐ์จำนวน 4 บึง ได้แก่ บึงประดิษฐ์ A B C และ D (รูปที่ 4-1) ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 1,237 ตร.ม. 975 ตร.ม. 992 ตร.ม. และ 813 ตร.ม. ตามลำดับ ระดับพื้นแตกต่างกัน 0.3 ม. สามารถกักเก็บได้ถึง 0.60 ม. ในแต่ละบึงได้ปลูกพืชพื้นถิ่นที่โตเร็ว และทนต่อสภาพแวดล้อม เช่น พุทธรักษา และกกสามเหลี่ยม และมีการปูผ้าและปลูกพืชคลุมดินตามคันดินรอบบึงประดิษฐ์เพื่อป้องกันการพังทลายของคันดิน

3) สระเติมน้ำจำนวน 2 สระ ได้แก่ สระเติมน้ำ A และ B (รูปที่ 4-1) มีพื้นที่ระดับปากสระ 1,250 ตร.ม. และ 1,160 ตร.ม. พื้นที่ก้นสระ 660 ตร.ม. และ 600 ตร.ม. มีความลึก 2.66 ม.และ 2.75 ม. มีความจุสูงสุดที่ระดับเก็บกัก 2 ม. จากก้นสระเท่ากับ 1,830 ลบ.ม. และ 1,690 ลบ.ม. ตามลำดับ มีความลาดชันด้านข้าง 1.5:1 เพื่อความมั่นคง มีทรายกรองที่ก้นสระความหนา 0.5 ม. และมีการปูวัสดุกรองสังเคราะห์ที่บริเวณด้านข้างและที่พื้นสระ เพื่อกรองและป้องกันการกัดเซาะจากคลื่นที่เกิดขึ้น

4) อาคารสำนักงานสนามและระบบควบคุม ประกอบด้วย ห้องทำงาน ห้องประชุม ระบบควบคุมไฟฟ้า และห้องสุขาไว้ภายในอาคาร



รูปที่ 4-1 องค์ประกอบของระบบเติมน้ำ

5) ระบบตรวจวัดภูมิอากาศ ประกอบด้วย การตรวจวัดปริมาณฝนจากเครื่องวัดน้ำฝนอัตโนมัติที่ติดตั้งในพื้นที่โครงการ และการตรวจวัดการระเหย โดยใช้ถาดวัดการระเหย แบบ Class A

6) ระบบตรวจวัดระดับน้ำผิวดิน ประกอบด้วย การตรวจวัดปริมาณน้ำผิวดิน โดยใช้ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 6 จุด และการตรวจวัดระดับน้ำ โดยใช้ไม้วัดระดับจำนวน 7 จุด

7) ระบบติดตามตรวจสอบระดับและคุณภาพน้ำบาดาล ประกอบด้วย การติดตั้งบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่โดยรอบสระเติมน้ำ จำนวน 47 บ่อ ทั้งบ่อระดับตื้นซึ่งมีความลึกน้อยกว่า 15 ม. และบ่อระดับลึกซึ่งลึกกว่า 15 ม. การติดตามตรวจสอบการเติมน้ำ ด้านปริมาณและคุณภาพ ส่วนระบบประเมินผลการเติมน้ำ ประกอบด้วย การประเมินผลการเติมน้ำผ่านสระ การประเมินประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์ และการดูแลรักษาระบบ

4.2 การทดสอบระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ

การทดลองระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบด้วยบึงประดิษฐ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดความขุ่นของบึงประดิษฐ์ในกรณีต่างกัน ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำผ่านบึงประดิษฐ์ ชนิดและความหนาแน่นของพืช และความขุ่นของน้ำดิบที่จุดเริ่มต้น ผลการทดสอบในช่วงฤดูฝน พ.ศ. 2553 จำนวน 18 การทดลอง พบว่า

1) ทดลองในบึงประดิษฐ์ที่ปลูกพืชแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ พุทธรักษา ข้าว และกกสามเหลี่ยม โดยควบคุมอัตราการไหลผ่านบึงประมาณ 30 ลบ.ม./ชม. และความขุ่นเริ่มต้นในคลองอยู่ในช่วง 45 - 119 NTU พบว่า บึงประดิษฐ์ที่ปลูกด้วยกกสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความขุ่น

2) ทดลองให้อัตราการไหลของน้ำผ่านบึงที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 0.5 9.5 15.6 และ 93.1 ลบ.ม./ชม. พบว่า อัตราการไหลของน้ำผ่านบึง 9.5 ลบ.ม./ชม. มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความขุ่น

3) บึงประดิษฐ์ที่ปลูกด้วยกกสามเหลี่ยม และอัตราการไหลของน้ำผ่านบึง 9.5 ลบ.ม./ชม. สามารถลดความขุ่นได้ร้อยละ 67

4.3 การทดลองเติมน้ำ

4.3.1 การทดลองการซึมผ่านชั้นตะกอนในห้องปฏิบัติการและสระทดลองขนาดเล็ก

วัตถุประสงค์ของการทดลองการซึมผ่านชั้นตะกอนเพื่อทดลองหาพารามิเตอร์และเกณฑ์คุณภาพน้ำดิบที่เหมาะสมใช้ประกอบการออกแบบก่อสร้างระบบเติมน้ำผ่านสระ ประกอบด้วย การทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า กรณีน้ำที่มีความขุ่นน้อย (0.5 NTU) และกรณีน้ำที่มีความขุ่นมาก (100 NTU) ระยะเวลาในการทดลอง 100 ชม. มีค่าอัตราการซึมสุดท้าย 3.27 ม./วัน และ 0.15 ม./วัน ตามลำดับ และการทดลองการในสระทดลองขนาดเล็ก กรณีน้ำดิบมีความขุ่นปานกลาง (51.2 NTU) ระยะเวลาในการทดลอง 30 ชม. มีค่าอัตราการซึมสุดท้าย 2.53 ม./วัน จากการทดลองยังไม่พบการอุดตัน ดังนั้นการนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้กับสระทดลองขนาดใหญ่จึงควรทำการทดลองใน

ระยะเวลาที่นานกว่า 100 ชม. และควรควบคุมความขุ่นของน้ำที่ใช้เติมให้มีค่าไม่เกิน 50 NTU รวมทั้งต้องมีระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบก่อนเติม

4.3.2 การทดลองเติมน้ำผ่านสระ

วัตถุประสงค์ของการทดลองเติมน้ำผ่านสระเพื่อศึกษาอัตราการเติมน้ำและการอุดตัน โดยเปรียบเทียบกรณีที่มีการใช้และไม่ใช้วัสดุกรองสังเคราะห์ที่พื้นสระ และกรณีน้ำที่ใช้เติมมีความขุ่นแตกต่างกันได้ผลดังนี้

1) ปริมาณน้ำที่เติมได้ทั้งหมด 25,797 ลบ.ม. และอัตราการเติมน้ำอยู่ในช่วง 0.05-2.05 ม./วัน (60-2,460 ลม.ม./วัน/ตร.ม.) ซึ่งความขุ่นของน้ำที่ใช้เติมมีค่าอยู่ในช่วง 12-287 NTU (ค่าเฉลี่ย 76 NTU)

2) การใช้และไม่ใช้วัสดุกรองสังเคราะห์ปูที่พื้นสระเพื่อกรองตะกอน มีค่าอัตราการซึมต่างกัน 0.04 ม./วัน ซึ่งมีค่าต่างกันน้อยมาก

3) ลักษณะการซึมสามารถแบ่งได้เป็น 4 ช่วง ได้แก่ ในช่วงแรก (วันที่ 1-4) อัตราการซึมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.14 ถึง 0.79 ม./วัน ในช่วงที่สอง (วันที่ 5-8) อัตราการซึมมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก 0.78 ถึง 0.28 ม./วัน ในช่วงที่สาม (วันที่ 9-15) อัตราการซึมลดลงจาก 0.27 ถึง 0.16 ม./วัน และในช่วงที่สี่ (วันที่ 16-30) อัตราการซึมค่อยๆ ลดลงจาก 0.15 ถึง 0.07 ม./วัน ซึ่งในช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่เกิดการอุดตัน

4) การประเมินปริมาณการเติมน้ำใต้ดินผ่านสระในช่วงฤดูฝน (ระยะเวลา 4 เดือน) กรณีน้ำที่ใช้เติมมีความขุ่น 70, 100 และ 140 NTU จะต้องทำความสะอาดสระเติมน้ำอย่างน้อยปีละ 1, 2 และ 4 ครั้ง ตามลำดับ การเติมน้ำจึงจะมีประสิทธิภาพ และกรณีน้ำที่ใช้เติมมีความขุ่น 70 NTU และมีการทำความสะอาด 4 ครั้ง จะมีปริมาณการเติมน้ำสูงสุดประมาณ 63,000 ลบ.ม./ปี

5) แนวทางในการพัฒนาโครงการลักษณะนี้ในอนาคตมี 3 แบบ ได้แก่ 1) ออกแบบเป็นบึงประดิษฐ์และสระเติมน้ำ 2) ออกแบบเป็นสระตกตะกอนและสระเติมน้ำ และ 3) ออกแบบเป็นสระเติมน้ำทั้งพื้นที่

4.4 การติดตามผลกระทบด้านระดับและคุณภาพน้ำบาดาล

การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลเนื่องจากการทดลองเติมน้ำเพิ่มขึ้นสูงสุด 3.33 ม. หลังจากทดลองผ่านไป 5 วัน หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลง น้ำบาดาลมีทิศทางการไหลจากพื้นที่สระเติมน้ำไปยังบริเวณโดยรอบสระและด้านทิศเหนือด้วยความเร็วการไหลเฉลี่ย 0.07 ม./วัน จากการติดตามตรวจวัดคุณภาพน้ำบาดาลทั้งด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ยังไม่พบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำที่มีนัยสำคัญ

4.5 การจัดการและบำรุงรักษาระบบเติมน้ำผ่านสระ

การจัดการและบำรุงรักษาระบบเติมน้ำผ่านสระ ประกอบด้วย การจัดการระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ การจัดการเติมน้ำ การจัดการด้านข้อมูล และการบำรุงรักษาระบบเติมน้ำผ่านสระ ดังนี้

1) การจัดการระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ ซึ่งจากการทดสอบประสิทธิภาพบึงประดิษฐ์เพื่อลดปัญหาการอุดตัน ควรควบคุมอัตราการไหลของน้ำดิบผ่านบึงให้มีค่าไม่เกิน 10 ลบ.ม./ชม. และควบคุมความขุ่นของน้ำดิบที่จุดเข้าให้มีค่าไม่เกิน 150 NTU

2) การจัดการระบบเติมน้ำ แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การตรวจวัดเพื่อประกอบการตัดสินใจในการเติมน้ำ และการตรวจวัดเพื่อศึกษาผลกระทบจากการเติมน้ำ ดังนี้

(2.1) ทำการตรวจวัดความขุ่นของน้ำดิบและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทุกวัน ทั้งในคลองและบึงประดิษฐ์สุดท้าย เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเติมน้ำ ซึ่งความขุ่นของน้ำที่ใช้เติมควรมีค่าไม่เกิน 50 NTU และอนุโลมให้มีค่าไม่เกิน 100 NTU ส่วนกรณีที่น้ำดิบมีความขุ่นเกิน 100 NTU ไม่ควรเติม

(2.2) การเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาผลกระทบจากการเติมน้ำ ควรดำเนินการทั้งในขณะที่มีการเติมน้ำและไม่มีการเติมน้ำ ซึ่งประกอบด้วย การตรวจวัดข้อมูลภูมิอากาศ การตรวจวัดระดับน้ำผิวดิน การตรวจวัดคุณภาพน้ำ การตรวจวัดปริมาณน้ำ การตรวจวัดระดับน้ำบาดาล การตรวจวัดคุณภาพน้ำบาดาล และการตรวจวัดการใช้น้ำบาดาล แล้วนำไปจัดเก็บในระบบฐานข้อมูล ซึ่งจะช่วยให้การค้นหาง่ายและสามารถนำไปวิเคราะห์ผลการเติมน้ำ รวมทั้งการรายงานผลการเติมน้ำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

3) การบำรุงรักษาระบบเติมน้ำผ่านสระ ประกอบด้วย ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ ระบบสระเติมน้ำ ระบบตรวจวัดภูมิอากาศ และระบบอาคารสถานที่ทั่วไปด้วยการติดตามตรวจสอบสภาพการใช้งาน ตามหัวข้อที่กำหนด และระเบียบวิธีการแจ้งบำรุงรักษา

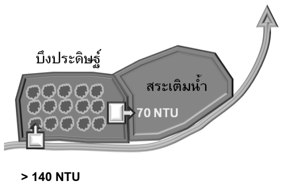
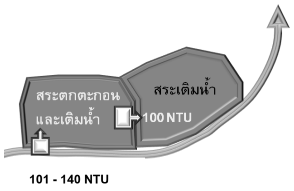
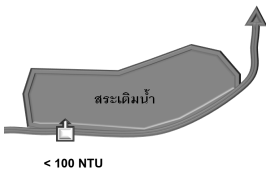
4.6 การประเมินผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

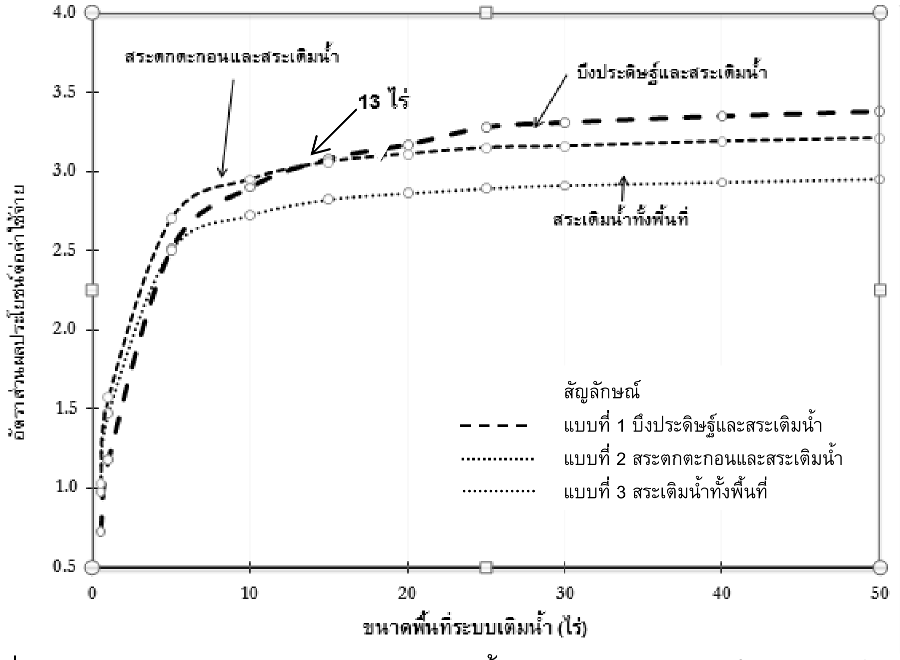
การประเมินผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายเบื้องต้นโดยวิธีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (Benefit-Cost Ratio, B/C Ratio) ซึ่งผลประโยชน์คำนวณจากประโยชน์ทางตรงที่เกิดจากใช้น้ำบาดาลที่เติมได้ (ประมาณร้อยละ 85 ของน้ำที่เติมได้ทั้งหมด) และก่อให้เกิดรายได้จากการปลูกข้าวประมาณ 4,600 บาท/ไร่/ปี และค่าใช้จ่ายคำนวณจากค่าก่อสร้าง (ค่าขุดสระและค่าก่อสร้างอาคารผันน้ำ) และค่าบำรุงรักษา (ค่าขุดลอกสระเติมน้ำและค่าดูแลรักษา) โดยกำหนดให้อัตราส่วนลดร้อยละ 5 และโครงการมีอายุ 10 ปี ได้ทำการประเมินผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายของระบบเติมน้ำทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 บึงประดิษฐ์และสระเติมน้ำ แบบที่ 2 สระตกตะกอนและสระเติมน้ำ และแบบที่ 3 สระเติมน้ำเต็มพื้นที่ ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4-1 และรูปที่ 4-2 อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้นี้เป็นเพียงแนวทางสำหรับการตัดสินใจพัฒนาโครงการในเบื้องต้น

4.7 สาระสำคัญ

การทดลองเติมน้ำ การประเมินค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนเบื้องต้น ประกอบด้วย การออกแบบและก่อสร้างระบบเติมน้ำ การทดสอบระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ การทดลองเติมน้ำผ่านสระ การติดตามผลกระทบด้านระดับน้ำบาดาลและคุณภาพน้ำบาดาล และการประเมินผลตอบแทนและค่าใช้จ่ายเบื้องต้น ดังนี้

ตารางที่ 4-1 ความเหมาะสมของระบบเติมน้ำแบบต่างๆ

แบบที่ 1 (บึงประดิษฐ์และสระเติมน้ำ)  	เหมาะสำหรับแหล่งน้ำดิบที่มีความขุ่นมากกว่า 140 NTU มีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายสูงเมื่อระบบเติมน้ำมีพื้นที่ตั้งแต่ 10 ไร่ขึ้นไป และจะมีจุดคุ้มทุนภายในระยะเวลา 3 ปี (รูปที่ 4-2)
แบบที่ 2 (สระตกตะกอนและสระเติมน้ำ)  	เหมาะสำหรับแหล่งน้ำดิบที่มีความขุ่นระหว่าง 101 - 140 NTU มีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายสูงเมื่อระบบเติมน้ำมีพื้นที่ตั้งแต่ 10 ไร่ขึ้นไป และจะมีจุดคุ้มทุนภายในระยะเวลา 3 ปี (รูปที่ 4-2)
แบบที่ 3 (สระเติมน้ำทั้งพื้นที่)  	เหมาะสำหรับแหล่งน้ำดิบที่มีความขุ่นไม่เกิน 100 NTU มีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายสูงเมื่อระบบเติมน้ำมีพื้นที่ตั้งแต่ 10 ไร่ขึ้นไป และจะมีจุดคุ้มทุนภายในระยะเวลา 4 ปี (รูปที่ 4-2)



รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดระบบเติมน้ำและอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย

1) การออกแบบและก่อสร้างระบบเติมน้ำ มีองค์ประกอบของระบบเติมน้ำผ่านสระ เช่น ระบบผันน้ำดิบด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบด้วยบึงประดิษฐ์ สระเติมน้ำ อาคารสำนักงานสนามและระบบควบคุม ระบบบำรุงรักษา และระบบประเมินผลการเติมน้ำ

2) การทดสอบระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ ในช่วงฤดูฝน (ก.ค. - ต.ค. 2553) จำนวน 18 การทดลอง พบว่า บึงประดิษฐ์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบสำหรับการเติมน้ำผ่านระบบสระ ได้แก่ บึงประดิษฐ์ที่ปลูกด้วยกกสามเหลี่ยม และอัตราการไหลของน้ำผ่านบึง 9.5 ลบ.ม./ชม. ซึ่งสามารถลดความขุ่นได้ร้อยละ 67

3) การทดลองเติมน้ำผ่านสระ พบว่า

(3.1) ปริมาณน้ำที่เติมได้ทั้งหมด 25,797 ลบ.ม. และอัตราการเติมน้ำอยู่ในช่วง 0.05 - 2.05 ม./วัน (60-2,460 ลม.ม./วัน/ตร.ม.)

(3.2) การใช้และไม่ใช้วัสดุกรองสังเคราะห์ปูที่พื้นสระ มีค่าอัตราการซึมต่างกันน้อยมาก

(3.3) ลักษณะการซึมสามารถแบ่งได้เป็น 4 ช่วง คือ ช่วงวันที่ 1-4, 5-8, 9-15 และ 16-30 มีอัตราการซึม 0.14 ถึง 0.79, 0.78 ถึง 0.28, 0.27 ถึง 0.16 และ 0.15 ถึง 0.07 ม./วัน ตามลำดับ ซึ่งอัตราการซึมน้อยกว่า 0.15 ม./วัน เป็นช่วงที่เกิดการอุดตัน

(3.4) การประเมินปริมาณการเติมน้ำใต้ดินผ่านสระในช่วงฤดูฝน (ระยะเวลา 4 เดือน) กรณีน้ำที่ใช้เติมมีความขุ่น 70, 100 และ 140 NTU จะต้องมีการทำความสะอาดสระเติมน้ำอย่างน้อยปีละ 1, 2 และ 4 ครั้งตามลำดับ การเติมน้ำจึงจะมีประสิทธิภาพ และกรณีน้ำที่ใช้เติมมีความขุ่น 70 NTU และมีการทำความสะอาด 4 ครั้ง จะมีปริมาณการเติมน้ำสูงสุดประมาณ 63,000 ลบ.ม./ปี

(3.5) แนวทางในการพัฒนาโครงการลักษณะนี้ในอนาคต 3 แบบ ดังนี้ (1) การออกแบบเป็นบึงประดิษฐ์และสระเติมน้ำในกรณีที่น้ำดิบมีความขุ่นมากกว่า 140 NTU (2) การออกแบบเป็นสระตกตะกอนและเติมน้ำในกรณีที่น้ำดิบมีความขุ่นอยู่ในช่วง 101-140 NTU และ (3) การออกแบบเป็นสระเติมน้ำทั้งพื้นที่ในกรณีที่น้ำดิบมีความขุ่นน้อยกว่า 100 NTU

4) การติดตามผลกระทบด้านระดับและคุณภาพน้ำบาดาล การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 3.33 ม. น้ำบาดาลมีทิศทางการไหลจากพื้นที่สระเติมน้ำไปยังบริเวณโดยรอบสระและด้านทิศเหนือด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.07 ม./วัน การติดตามตรวจวัดคุณภาพน้ำบาดาลทั้งด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ยังไม่พบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำที่มีนัยสำคัญ

5) ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของระบบเติมน้ำนำร่องด้วยวิธีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายพบว่า หากขยายผลไปยังพื้นที่อื่นๆ ระบบเติมน้ำควรมีขนาดตั้งแต่ 10 ไร่ขึ้นไปจึงจะคุ้มทุนภายในระยะเวลา 3 ปี

บทที่ 5
แนวทางการจัดทำแผนหลักการเติมน้ำบาดาลและการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาล

แนวทางการจัดทำแผนหลักและการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาลมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางและเสนอตัวอย่างของการจัดทำแผนหลักการจัดการการเติมน้ำอย่างเป็นระบบในภาพรวมของพื้นที่ศึกษา โดยการรวบรวมหลักการและวิธีการเติมน้ำบาดาลแบบต่างๆ แนวคิดในการจัดทำแผนยุทธศาสตร์หรือแผนหลักการเติมน้ำบาดาลที่อิงแนวทางแผนหลักการจัดการเติมน้ำบาดาลของประเทศอินเดีย (Central Ground Water Board, 2002) แผนหลักการเติมน้ำบาดาลของประเทศแอฟริกาใต้ (Murray et al., 2007) ข้อมูลเชิงเทคนิคจากผลการศึกษาทดลองเติมน้ำผ่านสระ ข้อมูลทางอุทกธรณีวิทยา ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ผลการศึกษาด้านสิ่งแวดล้อมและงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

5.1 แนวทางการจัดทำแผนหลัก

5.1.1 องค์ประกอบ

การจัดทำแผนหลักการจัดการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาลควรดำเนินการโดยอาศัยข้อมูลรายละเอียดของการศึกษาด้านต่างๆ และมีกระบวนการจัดทำแผนหลักฯ ที่มีส่วนร่วมของหน่วยงานท้องถิ่น ประชาชน และภาคเอกชน แผนหลักมีองค์ประกอบที่สำคัญดังนี้

1) เป้าประสงค์ (goal) คือ การกำหนดเป้าหมายระยะยาวของแผน
2) ประเด็นยุทธศาสตร์ (theme) คือ ประเด็นที่ต้องดำเนินการเพื่อให้บรรลุเป้าประสงค์
3) วัตถุประสงค์ของประเด็นยุทธศาสตร์ (management objectives)
4) การประเมินสภาวะปัจจุบันของการดำเนินงานในแต่ละประเด็นยุทธศาสตร์ (situation assessments)
5) กลยุทธ์ (strategic approach) การดำเนินงานให้บรรลุวัตถุประสงค์ของแต่ละประเด็นยุทธศาสตร์
6) กิจกรรม (action) ที่ต้องดำเนินการในแต่ละกลยุทธ์
7) ความรับผิดชอบ (responsibility) ของแต่ละองค์กรในการปฏิบัติการตามแผนหลัก
8) การจัดลำดับความสำคัญ (priority) ของกิจกรรมในแต่ละกลยุทธ์

5.1.2 เป้าประสงค์ของแผนหลัก

เป้าประสงค์ของแผนหลักการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาลควรครอบคลุมถึงกระบวนการทางสถาบัน การพัฒนาวิชาการ จิตสำนึกของการอนุรักษ์ และบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลอย่างมีส่วนร่วมของประชาชน ควรกำหนดกรอบเวลาของแผนหลักไว้ 3 ระยะคือ ระยะสั้น ระยะกลาง และระยะยาว โดยระยะเวลาช่วงต่าง ๆ กรมทรัพยากรน้ำบาดาลควรประเมินจากผลการประเมินสภาวะปัจจุบันและศักยภาพขององค์กร และบุคลากร

5.1.3 ประเด็นยุทธศาสตร์ของแผนการเติมน้ำบาดาล

ประเด็นยุทธศาสตร์ทั้งหมดของแผนการเติมน้ำบาดาลที่ควรดำเนินการเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของแผนหลัก ประกอบด้วย

1) องค์ความรู้ (knowledge theme) เพื่อสร้างจิตสำนึกและให้ความรู้ด้านการเติมน้ำบาดาลแก่ประชาชนในท้องถิ่น
2) กฎหมายและกฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง (legislation and regulation theme) เพื่อสร้างกฎระเบียบที่เอื้อต่อการเติมน้ำบาดาล และจัดตั้งองค์กรที่จะทำหน้าที่สร้างและดูและระบบการเติมน้ำบาดาลให้เป็นส่วนหนึ่งของการจัดการน้ำแบบบูรณาการ
3) การวางแผน (planning theme) เพื่ออำนวยความสะดวกแก่การเติมน้ำบาดาลอย่างยั่งยืน มีประสิทธิภาพ และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
4) การปฏิบัติตามแผน (implementation theme) เพื่อช่วยให้องค์กรที่ทำหน้าที่จัดการน้ำและการให้บริการด้านน้ำในการเติมน้ำทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5) การจัดการ (management theme) เพื่อให้มีการเติมน้ำบาดาลอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด
6) การวิจัย (research theme) เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ที่สนับสนุนการดำเนินงานเติมน้ำบาดาลให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงในระยะยาว
7) การปฏิบัติตามกลยุทธ์ (strategy implementation theme) เพื่อปรับปรุงกลยุทธ์การเติมน้ำบาดาลให้ทันสมัยอยู่เสมอ

5.1.4 กลยุทธ์และแผนงานเบื้องต้น

ประเด็นยุทธศาสตร์ประกอบด้วย กลยุทธ์ แผนงาน และลำดับความสำคัญของงานต่าง ๆ ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวถึงในรายงานหลักและในที่นี้จะสรุปแนวทางดำเนินการของแต่ละประเด็นยุทธศาสตร์ได้ดังนี้

1) ประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 1 องค์ความรู้

สร้างจิตสำนึกและให้ความรู้ด้านการเติมน้ำบาดาลแก่ท้องถิ่น ผ่านการประชาสัมพันธ์ สร้างเครือข่าย และสร้างองค์กรประสานงานเพื่อการจัดการเติมน้ำบาดาลในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง เพื่อให้เกิดการตื่นตัวของประชาชนและหน่วยงานท้องถิ่น ให้การศึกษาแก่นักเรียน เจ้าหน้าที่รัฐ และผู้ที่เกี่ยวข้อง ให้ทราบข้อดีข้อด้อยของระบบการเติมน้ำบาดาล ประชาสัมพันธ์โครงการนำร่องโดยการสร้างและใช้เป็นสถานที่ศึกษาดูงานและสงวนไว้เป็นศูนย์การเรียนรู้เรื่องการเติมน้ำบาดาล กำหนดให้มีผู้ประสานงานโครงการในทุกเขตจังหวัดนำผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเข้ามาศึกษาดูงานในพื้นที่ทดลอง และจัดตั้งหน่วยงานย่อยเพื่อดำเนินการขยายโครงการไปในท้องถิ่นต่าง ๆ ตามลำดับความสำคัญ

2) ประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 2 กฎหมายและกฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง

สร้างกฎระเบียบที่เอื้อต่อการเติมน้ำบาดาลและสร้างองค์กรทำหน้าที่สร้างและดูและระบบการเติมน้ำบาดาลให้เป็นส่วนหนึ่งของการจัดการน้ำแบบบูรณาการ ประเด็นสำคัญคือการเติมน้ำ

บาดาลยังไม่มีปรากฏในกฎหมายน้ำบาดาล และไม่มีความสอดคล้อง ดังนั้นควรเร่งปรับปรุงกฎหมายให้มีความเหมาะสมกับระบบการเติมน้ำบาดาลให้มากขึ้นโดยการหาแนวทางการจัดทำกฎหมายที่รองรับระบบการเติมน้ำบาดาล จัดทำคู่มือการให้อนุญาตการสร้างโครงการเพื่อการเติมน้ำบาดาล และจัดอบรมเจ้าหน้าที่ และทบทวนผลการศึกษาด้านการเติมน้ำบาดาลและกฎหมายอื่นๆ เพื่อทำการปรับปรุงกฎหมายอยู่เสมอ

3) ประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 3 การวางแผน

กรมทรัพยากรน้ำบาดาลควรเร่งรัดการสำรวจ รวบรวมข้อมูล เพื่อจัดทำแผนหลัก (master plan) การจัดการเติมน้ำบาดาลในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง เพื่ออำนวยความสะดวกแก่การเติมน้ำบาดาลให้มีความยั่งยืน มีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การวางแผนการเติมน้ำบาดาลควรดำเนินการให้มีความเหมาะสมในทุกระดับพื้นที่ ทั้งระดับประเทศ ระดับภูมิภาค และระดับท้องที่ ประเด็นต่างๆ ที่ต้องบรรจุในแผน คือ

(3.1) แผนการเติมน้ำบาดาลต้องครอบคลุมการจัดการน้ำ 2 ประเด็น คือ การบริหารจัดการและการอนุรักษ์แหล่งน้ำบาดาล และการใช้น้ำหรือการจัดหาน้ำ

(3.2) ศึกษาประเมินศักยภาพการเติมน้ำบาดาลในแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำและพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย หรือแอ่งน้ำบาดาล หรือขอบเขตพื้นที่บริหารจัดการน้ำ (water management areas)

(3.3) กำหนดพื้นที่เป้าหมายที่ต้องการเติมน้ำบาดาล รวมถึงพื้นที่วิกฤติน้ำบาดาลที่ระดับน้ำบาดาลลดลงมากเนื่องจากการสูบใช้น้ำบาดาล แหล่งน้ำดิบที่เหมาะสม และชั้นน้ำบาดาลที่มีลักษณะที่เหมาะสมเชิงชลศาสตร์และเชิงคุณภาพต่อการเติมน้ำบาดาล

(3.4) กำหนดพื้นที่ที่ต้องการวางแผนเป็นพิเศษและมีความจำเป็นต้องเติมน้ำบาดาลและจะก่อให้เกิดผลกระทบสูงสุด (significant impact) ตัวอย่างเช่น พื้นที่ที่ต้องการการสำรองน้ำเพื่อลดความเสี่ยงจากภัยแล้งหรือภาวะภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง เป็นต้น

(3.5) กำหนดพื้นที่ที่การพัฒนาระบบเติมน้ำบาดาลมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์

4) ประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 4 การปฏิบัติตามแผน

กรมทรัพยากรน้ำบาดาลควรสนับสนุนองค์กรจัดการน้ำและองค์กรให้บริการน้ำในการปฏิบัติการตามแผนการเติมน้ำบาดาล กลยุทธ์เพื่อสนับสนุนให้การพัฒนาระบบเติมน้ำบาดาลประสบความสำเร็จมีดังนี้

(4.1) พัฒนาระบบการติดตามตรวจสอบระดับน้ำบาดาล

(4.2) จัดทำคู่มือทางเทคนิคสนับสนุนการก่อสร้างระบบเติมน้ำบาดาล

(4.3) สร้างแรงจูงใจให้หน่วยงานท้องถิ่นดำเนินการเติมน้ำบาดาล สร้างแนวคิดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่แล้วในการพัฒนาระบบเติมน้ำมากกว่าที่จะใช้วิธีการที่ใช้การลงทุนสูง

(4.4) พัฒนากระบวนการสนับสนุนการสร้างระบบเติมน้ำบาดาล

(4.5) พัฒนาหลักสูตรและการอบรมการสร้างระบบเติมน้ำ

5) ประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 5 การจัดการ

การจัดการการเติมน้ำบาดาลในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างยังไม่มีระบบการจัดการอย่างเป็นทางการ ปัจจุบันการดำเนินการเป็นการเริ่มต้นด้วยการศึกษาวิจัยด้วยโครงการนำร่องด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน และยังไม่มีแผนการจัดการอื่นๆ อย่างเป็นระบบ แต่การดำเนินการเติมน้ำบาดาลต้องมีการจัดการด้านงบประมาณ การวางแผน การควบคุม และการพัฒนาบุคลากรเพื่อให้ระบบการเติมน้ำในภาพรวมประสบความสำเร็จ กิจกรรมที่สำคัญในการเติมน้ำบาดาลต้องมีการจัดการให้มีประสิทธิภาพการผันน้ำดิบสู่แหล่งเติมน้ำ การบำบัดน้ำดิบ การสร้างระบบเติมน้ำ การป้องกันและจัดการการอุดตัน การตรวจสอบการตอบสนองจากการเติมน้ำบาดาลของชั้นน้ำบาดาล การสูบกลับมาใช้อย่างเหมาะสม และการจัดการคุณภาพน้ำที่สูบกลับมาใช้

แนวทางเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการระบบเติมน้ำบาดาลให้ประสบความสำเร็จประกอบด้วย 3 ด้าน ได้แก่

(5.1) ช่วยเหลือโดยการจัดทำคู่มือทางเทคนิคการเติมน้ำบาดาลที่มีประสิทธิภาพรวมถึงทักษะที่ต้องใช้ในการเดินระบบ กระบวนการประเมินประสิทธิภาพ และการจัดการข้อมูล

(5.2) พัฒนาหลักสูตรและการอบรมการสร้างและดูแลรักษาระบบเติมน้ำ

(5.3) จัดทำมาตรฐานการเติมน้ำบาดาลด้านการออกแบบ ก่อสร้าง เดินระบบ และดูแลรักษา

6) ประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 6 การวิจัย

ส่งเสริมการวิจัยเชิงลึกเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการเติมน้ำบาดาล และส่งเสริมการวิจัยอย่างมีส่วนร่วมเพื่อนำการวิจัยที่ไปสู่การปฏิบัติในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงในระยะยาว มีการรวบรวมปัญหาและอุปสรรคเป็นฐานความรู้เพื่อนำไปสู่การจัดทำคู่มือการพัฒนาระบบเติมน้ำและการบำรุงรักษา โดยวิธีการที่แตกต่างกัน 4 วิธี คือ การเติมน้ำผ่านการเก็บเกี่ยวน้ำฝนจากหลังคา การเติมน้ำผ่านสระ การเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาล และการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับลึก โครงการวิจัยที่ดำเนินการโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ควรแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ งานวิจัยเชิงลึก และงานวิจัยเพื่อนำไปสู่การปฏิบัติในระยะสั้น กลยุทธ์การวิจัยสนับสนุนการพัฒนาระบบเติมน้ำบาดาลมีดังนี้

(6.1) วิจัยเพื่อพัฒนาหลักการหรือจัดทำคู่มือทางเทคนิคการเติมน้ำบาดาล

(6.2) วิจัยประเด็นคุณภาพน้ำและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ด้านอุทกธรณีเคมีและการอุดตันในพื้นที่ที่มีปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลมาก การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดมาใช้เป็นน้ำดิบในการเติมสู่ชั้นน้ำบาดาล เป็นต้น

(6.3) วิจัยประเด็นเชิงเศรษฐศาสตร์และสังคมของการเติมน้ำบาดาล

7) ประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 7 การปฏิบัติตามกลยุทธ์

การนำแผนนี้ไปสู่การปฏิบัติการ ควรเริ่มต้นจากการจัดทำแผนหลักขั้นรายละเอียดในพื้นที่ และเตรียมความพร้อมของการนำแผนสู่การปฏิบัติ

ปัจจัยความสำเร็จของโครงการการเติมน้ำบาดาลที่ควรศึกษาให้ละเอียดก่อนดำเนินการสร้างโครงการ ประกอบด้วย ความต้องการโครงการเติมน้ำบาดาล แหล่งน้ำดิบ ชลศาสตร์

ของชั้นน้ำบาดาล คุณภาพน้ำ วิธีการเติมน้ำบาดาล ประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม ประเด็นด้านกฎหมาย เศรษฐศาสตร์ สังคม การจัดการ และการเตรียมความพร้อมขององค์กร การจัดการเติมน้ำบาดาลจำเป็นต้องมีการดำเนินการโดยสถาบันและหน่วยงานที่มีอำนาจหน้าที่ในการจัดการเติมน้ำบาดาล ส่งเสริมการเติมน้ำบาดาลในท้องถิ่นโดยให้หน่วยงานท้องถิ่นหรือภาคเอกชนมีส่วนร่วมในการพิจารณาความเหมาะสมให้รอบด้านทั้งด้านวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม กระบวนการพิจารณาให้อนุญาตหน่วยงานดำเนินการพัฒนาโครงการเติมน้ำบาดาลควรแบ่งออกเป็น 4 ระยะ คือ ระยะก่อนศึกษาความเหมาะสม ระยะศึกษาความเหมาะสม และระยะดำเนินการ และระยะเดินระบบและบำรุงรักษา

5.2 แนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาล

5.2.1 แนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาลในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนาและพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่

การศึกษาสมดุลน้ำบาดาลในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนาและพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่พบว่า ขาดดุลประมาณปีละ 0.23 และ 51 ล้าน ลบ.ม. น้ำบาดาลมีการลดระดับปีละ 25 ซม. และ 26 ซม. ตามลำดับ หากปริมาณการใช้น้ำบาดาลยังคงปริมาณเท่าเดิมและไม่มีการเพิ่มเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลโดยวิธีต่างๆที่เสนอมา อาจเกิดวิกฤติขาดแคลนน้ำบาดาลในอนาคตอันใกล้ จากการศึกษาการจำลองทางคณิตศาสตร์ของสภาพแหล่งน้ำบาดาลอย่างละเอียดพร้อมทั้งการปรับเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบอุทกวิทยาและอุทกธรณีวิทยาแล้วได้นำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการเติมน้ำผ่านสระและจำลองแนวทางการจัดการเติมน้ำในอนาคตเพื่อศึกษาแนวทางการเติมน้ำผ่านสระในพื้นที่ที่มีศักยภาพ โดยมีแผนการจำลองได้แก่ กรณีการเติมน้ำที่สามารถทำให้ระบบเกิดความสมดุล และกรณีการเติมน้ำเพื่อยกระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น 2 ม. ภายในระยะเวลา 10 ปี โดยพิจารณาจากข้อมูลเบื้องต้นดังนี้

1) ปริมาณการเพิ่มเติมน้ำที่ทำให้ระบบสมดุล
2) ปริมาณการเพิ่มเติมน้ำที่ทำให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น 2 ม. คำนวณจาก
   ขนาดพื้นที่ศึกษา (ตร.ม.) x Specific Yield (S_y) x 2 ม./ปี x 10 ปี
   (S_y คือค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิการกักเก็บจำเพาะของชั้นหินอุ้มน้ำ)
3) อัตราการเติมน้ำเฉลี่ย 0.2 ม./วัน (จากผลการทดลอง)
4) ระยะเวลาการเติมน้ำ 120 วัน ช่วงเดือนกรกฎาคม – ตุลาคม (ฤดูฝน)
5) ขนาดพื้นที่ของสระเติมน้ำในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนาและพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่ กำหนดให้สระเติมน้ำ 1 แห่ง มีขนาด 1,600 ตร.ม. (1 ไร่) และ 40,000 ตร.ม. (25 ไร่)
6) จำนวนสระเติมน้ำ คำนวณได้จาก ปริมาณน้ำที่ต้องการเพิ่ม (ลบ.ม./ปี) / อัตราการเติมน้ำ (ลบ.ม./ปี)
7) พื้นที่ที่มีศักยภาพในการเติมน้ำ ได้แก่ พื้นที่ที่มีความเหมาะสมด้านสภาพอุทกธรณีวิทยา อยู่ใกล้กับแหล่งน้ำผิวดิน ถนน และใกล้กับพื้นที่เป้าหมายที่ต้องการยกระดับน้ำบาดาล

ผลการศึกษาพบว่า การประเมินปริมาณการเติมน้ำผ่านสระขนาด 1 ไร่ พื้นที่นำร่องบ้านหนองนาในช่วงฤดูฝน พบว่า เกษตรกรสามารถนำน้ำไปใช้ในการปลูกข้าวได้พื้นที่ 16 ไร่

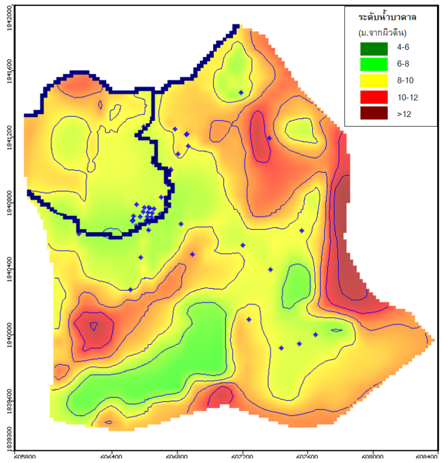
การจำลองเติมน้ำในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนาเพื่อให้ระบบน้ำบาดาลเกิดความสมดุลต้องเติมน้ำประมาณ 0.20 ล้าน ลบ.ม. และใช้พื้นที่สระเติมน้ำ 6 ไร่ ส่วนการจำลองเติมน้ำเพื่อให้ระดับน้ำบาดาลปรับตัวสูงขึ้น 2 ม./ปี ในระยะ 10 ปี โดยปริมาณการสูบใช้น้ำเท่าเดิม ต้องเติมน้ำประมาณ 1.81 ล้าน ลบ.ม. และใช้พื้นที่สระเติมน้ำ 11 ไร่ ขนาดพื้นที่วิกฤติซึ่งมีความลึกของระดับน้ำบาดาลมากกว่า 8 ม. จากผิวดินในสภาวะปัจจุบัน (พ.ศ.2553) มีพื้นที่ 500 ไร่ (0.8 ตร.กม.) อีก 10 ปีข้างหน้า (พ.ศ.2563) เมื่อพฤติกรรมการสูบใช้น้ำบาดาลยังคงเดิมพื้นที่ดังกล่าวจะขยายเป็น 2,194 ไร่ (3.51 ตร.กม.) หากมีการเพิ่มเติมน้ำเพื่อให้สมดุล และเพื่อให้ระดับน้ำปรับตัวสูงขึ้น 2 ม. ในระยะ 10 ปี บริเวณที่มีระดับน้ำบาดาลลึกมากกว่า 8 ม. จะมีเนื้อที่ลดลงเหลือ 856 ไร่ (1.37 ตร.กม.) และ 475 ไร่ (0.76 ตร.กม.) ตามลำดับ

การจำลองเติมน้ำในพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่เพื่อให้ระบบน้ำบาดาลเกิดความสมดุลต้องเติมน้ำ 51.18 ล้าน ลบ.ม. และใช้พื้นที่สระเติมน้ำ 1,400 ไร่ ส่วนการจำลองเติมน้ำเพื่อให้ระดับน้ำบาดาลปรับตัวสูงขึ้น 2 ม./ปี ในระยะ 10 ปี โดยปริมาณการสูบใช้น้ำเท่าเดิม ต้องเติมน้ำประมาณ 927 ล้าน ลบ.ม. และใช้พื้นที่สระเติมน้ำ 2,450 ไร่ ผลการศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาลในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนาและพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 5-1 และรูปที่ 5-2 ขนาดพื้นที่วิกฤติซึ่งมีความลึกของระดับน้ำบาดาลมากกว่า 8 ม.จากผิวดินในสภาวะปัจจุบัน (พ.ศ.2553) มีพื้นที่ 347,500 ไร่ (566 ตร.กม.) อีก 10 ปีข้างหน้า (พ.ศ.2563) เมื่อพฤติกรรมการสูบใช้น้ำบาดาลยังคงเดิมพื้นที่ดังกล่าวจะขยายเป็น 510,000 ไร่ (816 ตร.กม.) หากมีการเพิ่มเติมน้ำเพื่อให้เกิดสมดุล และเพื่อให้ระดับน้ำปรับตัวสูงขึ้น 2 ม. ในระยะ 10 ปี บริเวณที่มีระดับน้ำบาดาลลึกมากกว่า 8 ม. จะมีเนื้อที่ลดลงเหลือ 275,625 ไร่ (441 ตร.กม.) และ 151,250 ไร่ (242 ตร.กม.) ตามลำดับ

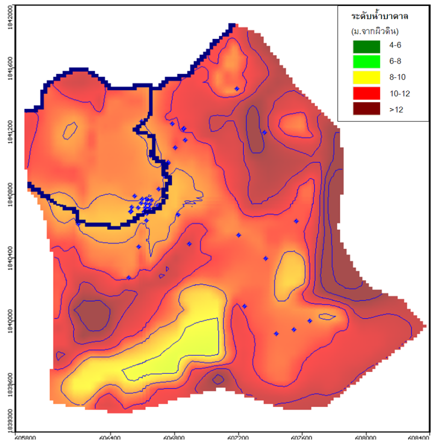
5.2.2 แนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง

พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างมีการเติมน้ำบาดาลตามธรรมชาติประมาณ 6,980 ล้าน ลบ.ม./ปี การเพิ่มเติมน้ำและสูญเสียน้ำให้กับแม่น้ำประมาณ 415 และ 179 ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ การใช้น้ำบาดาลเพื่อการเกษตรประมาณ 7,785 ล้าน ลบ.ม./ปี ทำให้น้ำบาดาลขาดสมดุลประมาณ 569 ล้าน ลบ.ม./ปี หรือระดับน้ำบาดาลลดลงประมาณ 15 ซม./ปี แนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ดังกล่าว (รูปที่ 5-3) สามารถดำเนินการได้ดังนี้

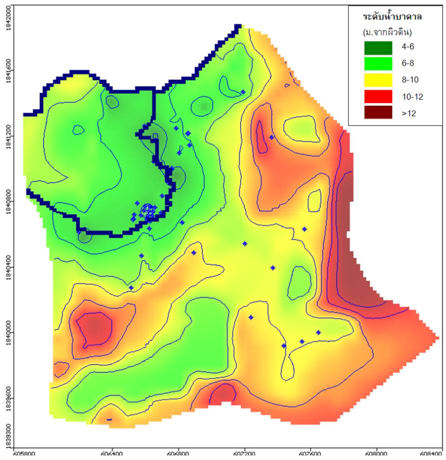
1) การเติมน้ำบาดาลให้สมดุลด้วยวิธีการเติมน้ำผ่านสระในพื้นที่ประมาณ 8,075 ไร่ และพื้นที่บ่อทรายประมาณ 2,550 ไร่ ร่วมกับวิธีการเติมน้ำผ่านบ่อบาดาลระดับลึก สามารถเติมน้ำได้ประมาณ 569 ล้าน ลบ.ม./ปี พื้นที่ได้รับประโยชน์ประมาณ 146,700 ไร่ ค่าใช้จ่ายภาครัฐในการพัฒนาระบบเติมน้ำในระยะเวลา 20 ปี ประมาณ 4,392 ล้านบาท เกษตรกรจะมีรายได้จากการปลูกข้าวประมาณ 10,036 ล้านบาท



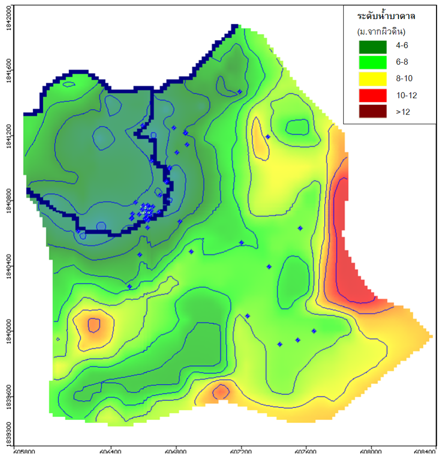
(ก) สภาวะปัจจุบัน (พ.ศ.2553)



(ข) กรณีไม่มีการเติมน้ำ ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ.2563)

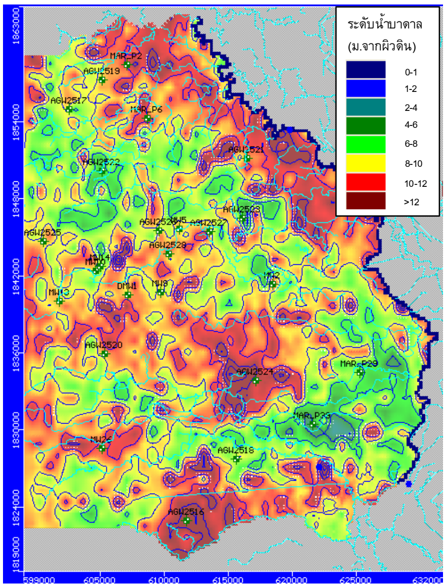


(ค) กรณีเติมน้ำเพื่อให้ระบบน้ำบาดาลสมดุล
ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ.2553-พ.ศ.2563)

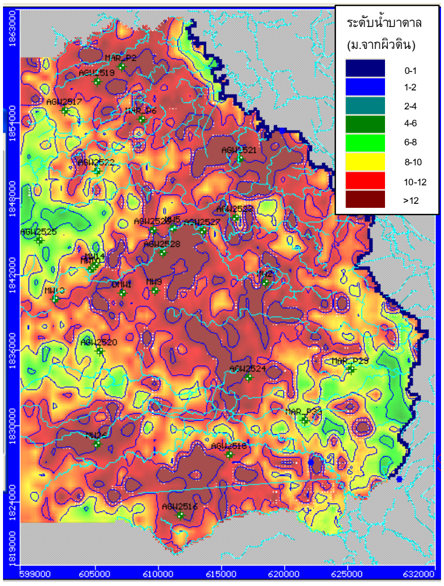


(ง) กรณีเติมน้ำเพื่อให้ระดับน้ำบาดาลสูงขึ้น 2 ม.
ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ.2553-พ.ศ.2563)

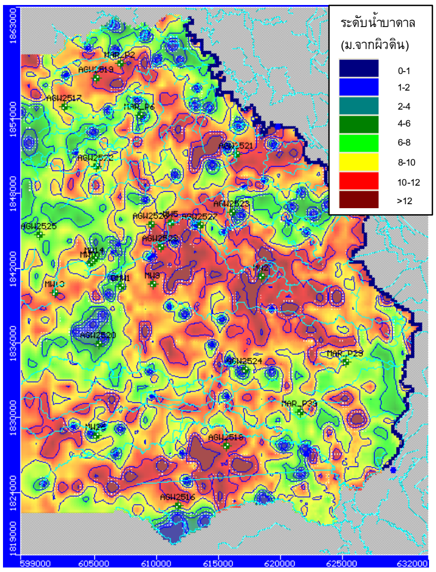
รูปที่ 5-1 แผนที่แสดงความลึกของระดับน้ำบาดาลพื้นที่นำร่องบ้านหนองนา



(ก) สภาวะปัจจุบัน (พ.ศ.2553)

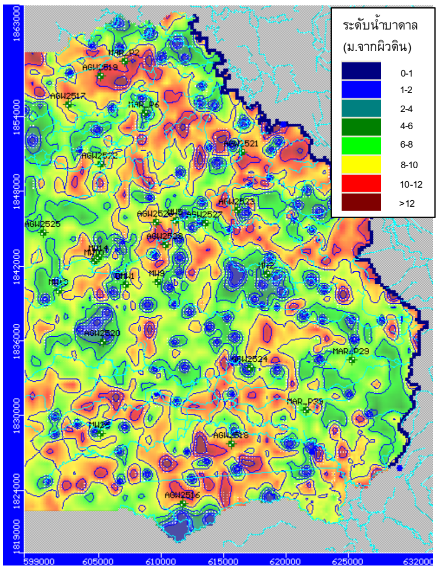


(ข) กรณีไม่มีการเติมน้ำ ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ.2563)



(ค) กรณีเติมน้ำเพื่อให้ระบบน้ำบาดาลสมดุล

ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ.2553-พ.ศ.2563)



(ง) กรณีเติมน้ำเพื่อให้ระดับน้ำบาดาลสูงขึ้น 2 ม.

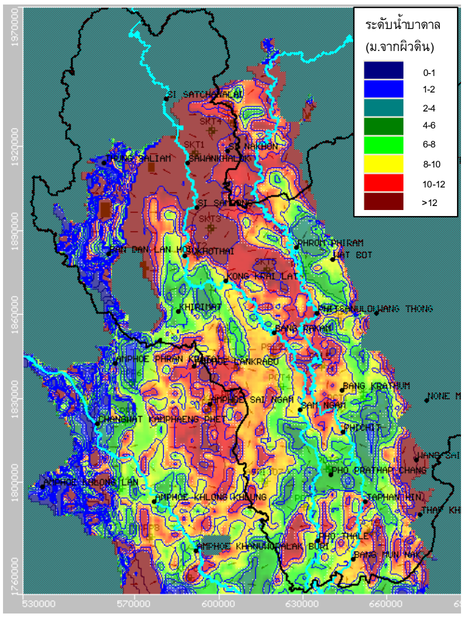
ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ.2553-พ.ศ.2563)

รูปที่ 5-2 แผนที่แสดงความลึกของระดับน้ำบาดาลพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่

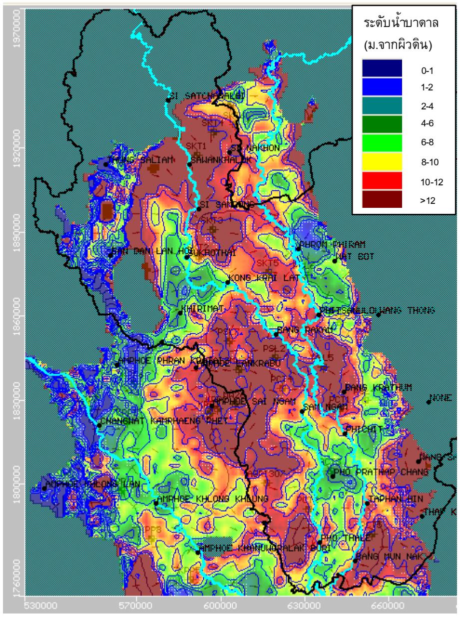
2) การเติมน้ำในพื้นที่วิกฤติเพื่อให้น้ำบาดาลยกระดับขึ้น 2 เมตร โดยเติมน้ำผ่านสระในพื้นที่ 16,388 ไร่ และพื้นที่บ่อทราย 2,550 ไร่ ร่วมกับวิธีการเติมน้ำผ่านบ่อบาดาลระดับลึก สามารถเติมน้ำได้ 1,044 ล้าน ลบ.ม./ปี มีพื้นที่ได้รับประโยชน์ประมาณ 365,000 ไร่ ค่าใช้จ่ายภาครัฐในการพัฒนาระบบเติมน้ำประมาณ 7,027 ล้านบาท เกษตรกรจะมีรายได้จากการปลูกข้าวประมาณ 33,580 ล้านบาท ผลการศึกษาสามารถช่วยลดพื้นที่ภัยแล้งได้จำนวน 20 ตำบล (ตารางที่ 5-1) และช่วยลดพื้นที่อุทกภัยได้จำนวน 133 ตำบล (ตารางที่ 5-2)

พื้นที่วิกฤติน้ำบาดาลในลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างจำแนกได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่ พื้นที่วิกฤติมากที่สุด น้ำบาดาลลึกมากกว่า 12 ม. ครอบคลุมพื้นที่ 26 ตำบล (ตารางที่ 5-3) พื้นที่วิกฤติมาก น้ำบาดาลลึก 10-12 ม. ครอบคลุมพื้นที่ 47 ตำบล (ตารางที่ 5-4) และพื้นที่วิกฤติปานกลาง น้ำบาดาลลึก 8-10 ม. ครอบคลุมพื้นที่ 73 ตำบล (ตารางที่ 5-5) ซึ่งรวมขนาดพื้นที่วิกฤติในลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างปัจจุบันมีขนาดพื้นที่ 6.56 ล้านไร่ (10,500 ตร.ก.ม) หากไม่มีการการเติมน้ำในอีก 10 ปีข้างหน้า ขนาดพื้นที่วิกฤติเพิ่มขึ้นเป็น 6.66 ล้านไร่ (10,656 ตร.ก.ม) หากมีการเติมน้ำให้เพิ่มระดับน้ำเพิ่มขึ้น 2 เมตร ขนาดพื้นที่วิกฤติลดลงเหลือ 6.30 ล้านไร่ (10,080 ตร.ก.ม)

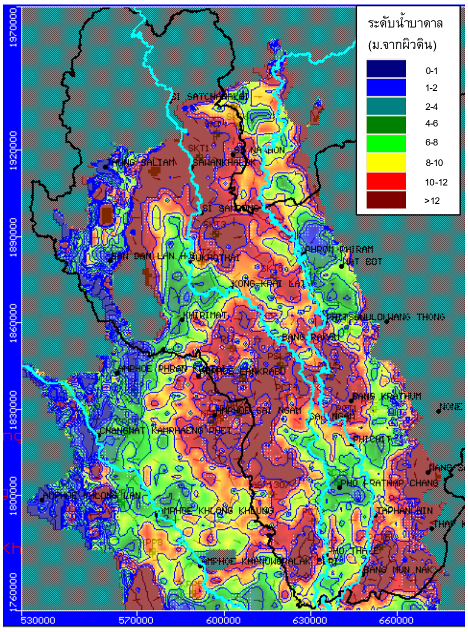
วิธีการเติมน้ำที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง ได้แก่ การเก็บเกี่ยวน้ำฝน การเติมน้ำผ่านสระ การเติมน้ำผ่านฝายเติมน้ำ การเติมผ่านบ่อแห้ง และวิธีการเติมน้ำผ่านบ่อบาดาลระดับลึก การคัดเลือกวิธีการเติมน้ำให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ต้องพิจาณาปัจจัยหลักด้านอุทกธรณีวิทยา (รูปที่ 5-4 และตารางที่ 5-6)



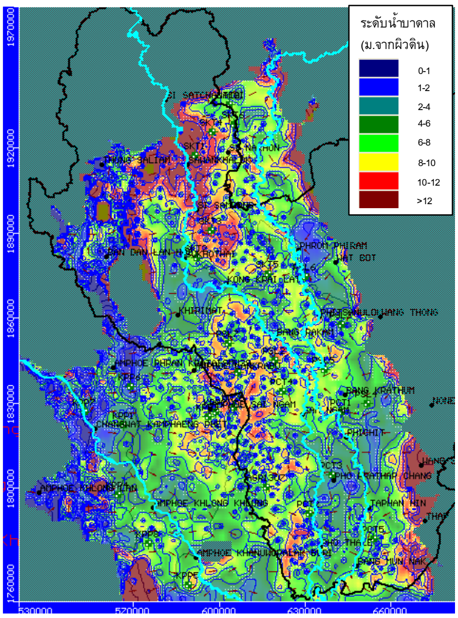
(ก) สภาวะปัจจุบัน (พ.ศ.2553)



(ข) กรณีไม่มีการเติมน้ำ ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ.2563)



(ค) กรณีเติมน้ำเพื่อให้ระบบน้ำบาดาลสมดุล
ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ.2553-พ.ศ.2563)



(ง) กรณีเติมน้ำเพื่อให้ระดับน้ำบาดาลสูงขึ้น 2 ม.
ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ.2553-พ.ศ.2563)

รูปที่ 5-3 แผนที่แสดงความลึกของระดับน้ำบาดาลพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง

ตารางที่ 5-1 ตำบลภัยแล้งที่เติมน้ำให้ระดับน้ำเพิ่มขึ้น 2 เมตร

จังหวัด	อำเภอ	ตำบล
สุโขทัย	ศรีสัชนาลัย	หนองอ้อ / ท่าชัย
	สวรรคโลก	ย่านยาว / ในเมือง / คลองกระจง / คลองยาง
	ทุ่งเสลี่ยม	ทุ่งเสลี่ยม
	ศรีสำโรง	นาขุนไกร
	เมือง	บ้านกล้วย
พิษณุโลก	บางระกำ	คุยม่วง / บางระกำ
	เมือง	สมอแข
พิจิตร	วชิรบารมี	บ้านนา / หนองหลุม / บึงบัว
	โพทะเล	บางลาย / ท้ายน้ำ / ทะนง
	เมือง	ป่ามะคาบ
	โพธิ์ประทับช้าง	ดงเสือเหลือง

ตารางที่ 5-2 ตำบลที่ได้รับการบรรเทาภัยน้ำท่วมจากการเติมน้ำ

จังหวัด	อำเภอ	ตำบล
สุโขทัย	ศรีสัชนาลัย	สารจิตร /หนองอ้อ
	สวรรคโลก	ย่านยาว / ป่ากุมเกาะ / วังพิณพาทย์ / นาทุ่ง / วังไม้ขอน / เมืองบางขลัง / หนองกลับ / ท่าทอง
	ศรีนคร	นครเดิฐ/ น้ำขุม /ศรีนคร
	ศรีสำโรง	บ้านซ่าน /ราวต้นจันทน์ /วัดเกาะ /บ้านไร่ /บ้านนา /วังลึก /วังทอง/ เกาะตาเลี้ยง /วังใหญ่ /ทับผึ้ง
	เมือง	บ้านกล้วย/ วังทองแดง /ตาลเตี้ย/ บ้านสวน /ปากแคว บ้านหลุม/ ยางซ้าย /ปากพระ
	คีรีมาศ	บ้านป้อม /ทุ่งหลวง /โตนด /สามพวง /หนองกระดิ่ง /หนองจิก
	กงไกรลาศ	ไกรใน/ ไกรกลาง /กกแรต /ไกรนอก/ ป่าแฝก/ บ้านใหม่สุขเกษม/ ดงเดือย/ บ้านกร่าง /กง /ท่าฉนวน /หนองตูม
พิษณุโลก	พรหมพิราม	ตลุกเทียม/ ศรีภิรมย์ /หนองแขม /วังวน /พรหมพิราม /ท่าช้าง /มะตูม
	บางระกำ	คุยม่วง /บางระกำ /ชุมแสงสงคราม /ท่านางงาม /บึงกอก/ ปลักแรด /วังอีทก /พันเสา /บ่อทอง
	เมือง	สมอแข/ มะขามสูง / ไผ่ขอดอน /จอมทอง /หัวรอ /ปากโทก /บ้านกร่าง /พลายชุมพล /อรัญยิก /บ้านคลอง /ท่าทอง/ ท่าโพธิ์ /บึงพระ /วัดพริก /วังน้ำคู้

ตารางที่ 5-2 ตำบลที่ได้รับการบรรเทาภัยน้ำท่วมจากการเติมน้ำ (ต่อ)

จังหวัด	อำเภอ	ตำบล
พิจิตร	วชิรบารมี	บ้านนา/ หนองหลุม /วังโมกข์
	โพทะเล	บางลาย / ท้ายน้ำ / ทะนง
	เมือง	ป่ามะคาบ /ย่านยาว /ท่าพอ/ ไผ่ขวาง /คลองคะเชนทร์ /ปากทาง /ในเมือง/ ท่าหลวง/ โรงข้าว /บ้านบุ่ง/ เมืองเก่า/ ฆะมัง /ดงกลาง /หัวดง /ดงป่าคำ
	โพธิ์ประทับช้าง	ดงเสือเหลือง/ วังจิก/ ไผ่รอบ /โพธิ์ประทับช้าง/ เนินสว่าง/ ไผ่ท่าโพ
	สามง่าม	สามง่าม /กำแพงดิน /รังนก /เนินปอ
	บึงนาราง	บึงนาราง/ บางลาย
	โพทะเล	วัดขวาง / ท้ายน้ำ / โพทะเล / ทุ่งน้อย / ทะนง / ท่าบัว / บ้านน้อย / ท่าขมิ้น / บางคลาน / ท่าเสา / ท่านั่ง
	ตะพานหิน	งิ้วราย / ห้วยเกตุ / วังหว้า / ทับหมัน / คลองคูณ / ไทรโรงโขน /ดงตะขบ
	บางมูลนาก	หอไกร / เนินมะกอก

ตารางที่ 5-3 วิธีการเติมน้ำในพื้นที่วิกฤติมากที่สุด

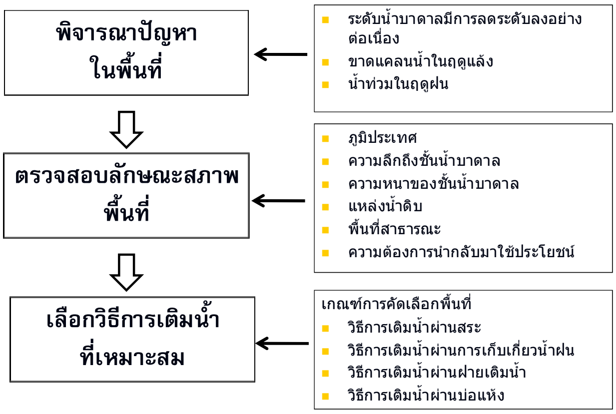
จังหวัด	อำเภอ	ตำบล	วิธีการเติมน้ำ
สุโขทัย	สวรรคโลก	ในเมือง /วังขอนไม้/ นาทุ่ง/ ป่ากุมเกาะ /ย่านยาว /คลองกระจง /เมืองบางขลัง /หนองกลับ /คลองยาง /ปากน้ำ	บ่อลึก
	เมือง	บ้านสวน /ตาลเตี้ย	สระ/ หลังคา
	กงไกรลาศ	ไกรใน	
	ศรีสำโรง	บ้านเกาะตาเลี้ยง /วังลึก บ้านนา /วัดเกาะนาขุนไกร	
	ศรีนคร	หาดเสี้ยว /ท่าชัย /นครเดิฐ	บ่อลึก/ สระ/ หลังคา
	วังทรายพูน	หนองพระ	สระ/ หลังคา/ ฝาย
พิจิตร	ทับคล้อ	เขาทราย	สระ/ หลังคา
พิษณุโลก	บางระกำ	หนองกุลา	สระ/ ฝาย/ หลังคา/ บ่อแห้ง
	เมือง	งิ้วราย	สระ/ หลังคา/ บ่อแห้ง
กำแพงเพชร	ขาณุวรลักษบุรี	วังชะพลู	สระ หลังคา ฝาย
	ไทรงาม	หนองแม่แตง	

ตารางที่ 5-4 วิธีการเติมน้ำในพื้นที่วิกฤติมาก

จังหวัด	อำเภอ	ตำบล	วิธีการเติมน้ำ
สุโขทัย	สวรรคโลก	ปากน้ำ	บ่อลึก
	ศรีสำโรง	บ้านซ่าน /วังทอง /ราวต้นจันทร์	สระ/ฝายเติมน้ำ
	ศรีนคร	คลองมะพลับ /ศรีนคร/ นครเดิฐ	บ่อลึก
	เมือง	ตาลเตี้ย/ บ้านสวน	สระ/ฝายเติมน้ำ/น้ำฝน
	กงไกรลาศ	ไกรกลาง/ กกแรต/ ดงเดือย/ ไกรนอก	
พิจิตร	โพทะเล	ท่าขมิ้น/ ทะนง	สระ/ฝายเติมน้ำ/น้ำฝน/บ่อแห้ง
	ตะพานหิน	ดงตะขบ	
	บางมูลนาก	ลำปะดา/ ภูมิ	
	กิ่ง อ.ดงเจริญ	สำนักขุนเณร/ ห้วยพุก	
พิษณุโลก	พรหมพิราม	ศรีภิรมย์/ วงฆ้อง/ วังวน/ พรหมพิราม/ ท่าช้าง/ มะตูม	สระ/ฝายเติมน้ำ/น้ำฝน/บ่อแห้ง
	เมือง	ไผ่ขอนดอน/ บ้านกร่าง/ ท่าทอง/ ท่าโพธิ์/ บึงพระ/ วัดพริก	
	บางระกำ	นิคมพัฒนา/ หนองกุลา	
	บางกระทุ่ม	ท่าตาล/ บ้านไร่	
กำแพงเพชร	ลานกระบือ	บึงทับแรต/ หนองหลวง/ ลายกระบือ/ช่องลม/ ประชาสุขสันต์	สระ/ฝายเติมน้ำ/น้ำฝน
	ไทรงาม	ไทรงาม/ หนองไม้กอง/ หนองคล้ำ/ หนองแม่แดง/ พานทอง	
	ทรายทองวัฒนา	ทุ่งทอง	

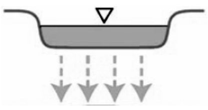
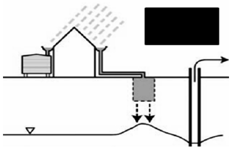
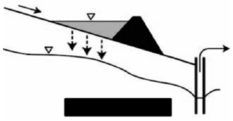
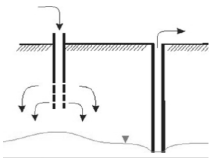
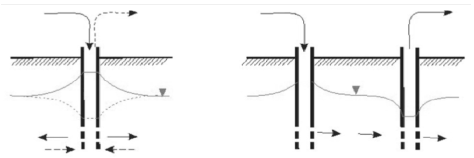
ตารางที่ 5-5 วิธีการเติมน้ำในพื้นที่วิกฤติปานกลาง

จังหวัด	อำเภอ	ตำบล	วิธีการเติมน้ำ
สุโขทัย	เมือง	วังทองแดง /บ้านกล้วย/ ยางซ้าย	สระ/ ฝายเติมน้ำ/ น้ำฝน
	กงไกรลาศ	ไกรนอก/ ป่าแฝกกง	
	ศรีสำโรง	ราวต้นจันทน์/ วังใหญ่/ บ้านไร่	
พิจิตร	วชิรบารมี	หนองหลุม /วังโมกข์ /บึงบัว /บ้านนา	สระ/ ฝายเติมน้ำ/ น้ำฝน/ บ่อแห้ง
	สามง่าม	กำแพงดิน /สามง่าม /เนินปอ /หนองโสน	
	เมือง	ย่านยาว /คลองคะเชนทร์	
	โพธิ์ประทับช้าง	เนินสว่าง /ทุ่งใหญ่ /ไผ่ท่าโพธิ์ /ดงเสือเหลือง	
	บึงนาราง	บึงนาราง /แหลมรัง /บางลาย	
	ตะพานหิน	ทับหมัน	
	บางมูลนาก	วังตะกู /เนินมะกอก /วังสำโรง	
	ดงเจริญ	สำนักขุนเณร /ห้วยพุก /ห้วยร่วม	
พิษณุโลก	บางระกำ	ชุมแสงสงคราม /คุยม่วง /ท่านางงาม/ นิคมพัฒนา /บางระกำ / บึงกอก/หนองกุลา /ปลักแรด /วังอีทก /พันเสา /บ่อทอง	สระ/ ฝายเติมน้ำ/ น้ำฝน/ บ่อแห้ง
	เมือง	วังน้ำคู้ /งิ้วงาม	
	พรหมพิราม	ตลุกเทียม /ศรีภิรมย์ /วังวน	
	วังทอง	วังทองแดง /วังพิกุล /ท่าหมื่นราม /พันชาลี	
	วัดโบสถ์	ท่างาม	
	บางกระทุ่ม	ท่าตาล/ นครป่าหมาก/ บางกระทุ่ม	
กำแพงเพชร	ขาณุวรลักษบุรี	บึงสามัคคี/ วังชะโอน /ระหาร /ยางสูง /โค้งไผ่ /เกาะตาล /แสนตอ	สระ/ ฝายเติมน้ำ/ น้ำฝน/ บ่อแห้ง
	ไทรงาม	มหาชัย /หนองไม้กรอง /หนองทอง	
	พรานกระต่าย	คลองพิไกร /เขาคีริส	
	เมือง	นิคมทุ่งโพธิ์ทะเล	
	ทรายทองวัฒนา	ทุ่งทอง	
	ลานกระบือ	บึงทับแรต /หนองหลวง	



รูปที่ 5-4 ขั้นตอนการคัดเลือกวิธีการเติมน้ำที่เหมาะสม

ตารางที่ 5-6 ปัจจัยในการคัดเลือกวิธีการเติมน้ำ

วิธีการเติมน้ำ [1]	ปัจจัยในการคัดเลือก
1. การเติมน้ำผ่านสระ 	- มีการลดของระดับน้ำบาดาล - ความลึกถึงชั้นทราย (ความหนาของชั้นดินเหนียว) - ความหนาของชั้นน้ำบาดาล - ระยะทางจากแหล่งน้ำผิวดิน
2. การเติมน้ำผ่านการเก็บเกี่ยวน้ำฝน 	- มีการลดของระดับน้ำบาดาล - ความหนาของชั้นน้ำบาดาล - ที่ตั้งของหมู่บ้านหรือแหล่งชุมชน - รางรับน้ำฝน
3. ฝายเติมน้ำ 	- ความลาดชัน - ลำดับของลำน้ำ - มีการลดของระดับน้ำบาดาล - ชนิดของตะกอนในฝาย
4. การเติมน้ำผ่านบ่อแห้ง 	- มีการลดของระดับน้ำบาดาล - ระยะทางจากแหล่งน้ำผิวดิน - ความหนาของชั้นน้ำบาดาล
5. การเติมผ่านบ่อบาดาลระดับลึก 	- มีการลดของระดับน้ำบาดาลระดับลึก - ระยะทางจากแหล่งน้ำผิวดิน - ความหนาของชั้นน้ำบาดาล

หมายเหตุ: [1] วิธีการเติมน้ำที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง (ดัดแปลงจากDillon, 2006)

5.3 แผนบูรณาการการพัฒนาระบบเติมน้ำ

การพัฒนาระบบเติมน้ำเพื่อให้เกิดผลสัมฤทธิ์จึงควรมีแผนบูรณาการการพัฒนาระบบเติมน้ำ (รูปที่ 4-1) และตารางที่ 5-7) ซึ่งดำเนินการโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาลร่วมกับหน่วยงานราชการต่างๆ เช่น องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น กรมชลประทาน กรมป่าไม้ กรมอุทยานสัตว์ป่าและพันธุ์พืช กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท เป็นต้น

ตารางที่ 5-7 แผนบูรณาการการพัฒนาระบบเติมน้ำ

มาตรการ	หน่วยงานรับผิดชอบ
1. ขุดลอกลำน้ำตื้นเขินให้ถึงระดับชั้นทราย เพื่อน้ำไหลสะดวกขึ้น และเป็นการเติมน้ำหลากลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน	องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น
2. เร่งรัดการจัดทำแหล่งเก็บกักน้ำในบริเวณต้นน้ำ เช่น อ่างเก็บน้ำ เพื่อเติมน้ำบาดาลและกักเก็บน้ำไว้ใช้ในฤดูแล้ง	กรมชลประทาน
3. ควรเร่งขยายโครงการก่อสร้างฝายชะลอน้ำและฝายเติมน้ำ ในพื้นที่ป่าไม้และเขตวนอุทยานแห่งชาติ	กรมป่าไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช กรมการปกครองส่วนท้องถิ่น หน่วยงานทหารพัฒนา
4. สร้างจิตสำนึกและปลูกฝังความรู้ความเข้าใจในคุณค่าของแหล่งน้ำบาดาลและความสำคัญของการเติมน้ำบาดาล	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
5. จัดทำแผนหลักการเติมน้ำบาดาล และผลักดันให้เป็นส่วนหนึ่งของการจัดการทรัพยากรน้ำของชาติ	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
6. เร่งรัดให้มีการเติมน้ำในพื้นที่ประสบภัยแล้งซ้ำซาก	องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น
7. ดำเนินการขุดลอกคลองระบายน้ำในเขตทางหลวงสาธารณะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำ และเป็นการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล	กรมทางหลวง, กรมทางหลวงชนบท, องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น
8. ขอความร่วมมือจากสถานที่ราชการให้มีระบบการเติมน้ำผ่านการเก็บเกี่ยวน้ำฝน เพื่อลดปริมาณน้ำหลากและฟื้นฟูแหล่งน้ำบาดาล	กรมทรัพยากรน้ำบาดาลและหน่วยงานราชการต่างๆ
9. อนุรักษ์และพัฒนาพื้นที่เติมน้ำตามธรรมชาติ เช่น บ่อทรายเก่า คูคลองสาธารณะ	องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น
10. เร่งพัฒนาเครือข่ายระบบบ่อสังเกตการณ์ เพื่อติดตามระดับน้ำบาดาลโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการใช้น้ำบาดาลจำนวนมาก	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

5.4 สาระสำคัญ

5.4.1 แนวทางการจัดทำแผนหลักการจัดการเติมน้ำบาดาล

แผนหลักการจัดการเติมน้ำบาดาลสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง จังหวัดพิษณุโลก สุโขทัย และพิจิตร ควรประกอบด้วย องค์ความรู้ กฏหมายและกฏระเบียบที่เกี่ยวข้อง การวางแผน การปฏิบัติตามแผน การจัดการ การวิจัย และการปฏิบัติตามกลยุทธ์

ปัจจัยความสำเร็จของการพัฒนาโครงการเติมน้ำบาดาล ประกอบด้วย ความต้องการโครงการ แหล่งน้ำดิบ ชลศาสตร์ของชั้นน้ำบาดาล คุณภาพน้ำ วิธีการเติมน้ำ โดยคำนึงถึงประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม กฏหมาย เศรษฐศาสตร์ สังคม การจัดการ และการเตรียมความพร้อมขององค์กร ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการดำเนินการด้านสถาบันและอำนาจหน้าที่ในการจัดการเติมน้ำบาดาล

การพัฒนาโครงการเติมน้ำบาดาลควรแบ่งเป็น 4 ระยะ คือ ระยะก่อนศึกษาความเหมาะสม ระยะศึกษาความเหมาะสม ระยะดำเนินการ และระยะเดินระบบและบำรุงรักษา

5.4.2 แนวทางการแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา

การแก้ไขปัญหาการลดระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาด้วยการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินด้วยวิธีการที่เหมาะสมโดยอาศัยผลการศึกษาจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์พบว่ามีแนวทางดำเนินการดังนี้

1) พื้นที่นำร่องบ้านหนองนา ควรมีการเติมน้ำผ่านสระเพื่อให้ระบบน้ำบาดาลเกิดความสมดุลต้องเติมน้ำประมาณ 0.23 ล้าน ลบ.ม. และใช้พื้นที่สระเติมน้ำ 6 ไร่ และหากต้องการให้ระดับน้ำบาดาลปรับตัวสูงขึ้น 2 ม. ในระยะเวลา 10 ปี โดยปริมาณการสูบใช้น้ำบาดาลเท่าเดิม ต้องเติมน้ำประมาณ 1.80 ล้าน ลบ.ม. และใช้พื้นที่สระเติมน้ำ 11 ไร่

2) พื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่ ควรมีการเติมน้ำผ่านสระเพื่อให้ระบบน้ำบาดาลเกิดความสมดุลต้องเติมน้ำประมาณ 51 ล้าน ลบ.ม. และใช้พื้นที่สระเติมน้ำ 1,400 ไร่ และหากต้องการให้ระดับน้ำบาดาลปรับตัวสูงขึ้น 2 ม. ในระยะเวลา 10 ปี โดยปริมาณการสูบใช้น้ำบาดาลเท่าเดิม ต้องเติมน้ำประมาณ 927 ล้าน ลบ.ม. และใช้พื้นที่สระเติมน้ำ 2,450 ไร่

3) พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างควรมีการเติมน้ำผ่านสระและเติมน้ำผ่านบ่อทรายเก่าเพื่อให้ระบบน้ำบาดาลเกิดความสมดุลภายในระยะเวลา 10 ปี ต้องใช้พื้นที่สระเติมน้ำ 8,075 ไร่ และพื้นที่บ่อทราย 2,550 ไร่ ซึ่งพื้นที่ได้รับประโยชน์มีประมาณ 146,700 ไร่ และหากต้องการให้ระดับน้ำบาดาลปรับตัวสูงขึ้น 2 ม. ในระยะเวลา 10 ปี ควรเติมน้ำในพื้นที่วิกฤติที่มีระดับน้ำบาดาลลึกมากกว่า 8 ม. ด้วยปริมาณ 1,044 ล้าน ลบ.ม./ปี โดยใช้พื้นที่เติมน้ำ 16,388 ไร่ และพื้นที่บ่อทราย 2,550 ไร่ ซึ่งพื้นที่ได้รับประโยชน์มีประมาณ 365,000 ไร่

ทั้งนี้การพัฒนาระบบเติมน้ำให้เกิดผลสัมฤทธิ์ควรดำเนินการตามแผนบูรณาการการพัฒนาระบบเติมน้ำระหว่างกรมทรัพยากรน้ำบาดาลร่วมกับหน่วยงานราชการต่างๆ เช่น องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น กรมชลประทาน กรมป่าไม้ กรมอุทยานสัตว์ป่าและพันธุ์พืช กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท เป็นต้น

บทที่ 6
วิจารณ์และข้อเสนอแนะ

การดำเนินงานด้านการเติมน้ำผ่านสระในขั้นต่อไปควรคำนึงถึงปัจจัยด้านการปรับปรุงประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์ การประเมินการอุดตันระดับลึกและการอุดตันทางชีวเคมี การปนเปื้อนในชั้นหินอุ้มน้ำ และผลกระทบเนื่องจากการขยายผลการศึกษาให้ครอบคลุมพื้นที่และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ดังนี้

1) การปรับปรุงประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์ เพื่อให้การเติมน้ำมีประสิทธิภาพและยั่งยืน รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยบึงประดิษฐ์อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติจึงไม่ต้องใช้สารเคมี กระบวนการสำคัญได้แก่ การตกตะกอน การดูดซึมของพืชและสาหร่าย การดูดซับของตะกอน การเปลี่ยนรูปทางเคมีในน้ำ การกรองผ่านพืชหรือจุลินทรีย์ที่ตาย และการซึมผ่านตะกอน (Hammer, 1989; Bavor and Mitcell, 1994) งานที่ควรดำเนินการเพิ่มเติม ได้แก่ การศึกษาแนวทางการลดความขุ่นของน้ำในบึงประดิษฐ์ให้ได้ประมาณร้อยละ 90 โดยพิจารณาชนิดและความหนาแน่นของพืช (พืชพืชถิ่นที่เหมาะสม คือ กกสามเหลี่ยม) ปริมาณตะกอนที่กำจัดได้ เวลาที่น้ำเดินทาง เพื่อให้ความขุ่นของน้ำที่ใช้เติมมีค่าต่ำกว่า 50 NTU ควรควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านบึงประดิษฐ์ให้มีค่าไม่เกิน 10 ลบ.ม./ชม. และความขุ่นของน้ำดิบที่จุดเข้าบึงประดิษฐ์มีค่าไม่เกิน 150 NTU ควรทำการทดลองในระยะเวลานานกว่า 100 วัน รวมทั้งควรมีผู้เชี่ยวชาญด้านบึงประดิษฐ์ให้คำแนะนำ

2) การประเมินการอุดตันระดับลึกและการอุดตันทางชีวเคมี ซึ่งการอุดตันจากการเติมน้ำผ่านสระสามารถเกิดได้ที่พื้นสระและในชั้นดินใต้พื้นสระ จากกระบวนการทางกายภาพ เคมี หรือชีวภาพ งานที่ควรดำเนินการเพิ่มเติม ได้แก่ การหาความลึกของการอุดตันในชั้นดินด้วยการติดตามตรวจวัดแรงดันและคุณภาพน้ำในชั้นดินใต้พื้นสระ การศึกษารายละเอียดของดินและการเปลี่ยนแปลงความพรุนของดินทั้งในห้องปฏิบัติการและการทดลองในภาคสนาม (Pavelic et al., 2007)

3) การปนเปื้อนในชั้นหินอุ้มน้ำเนื่องจากการเติมน้ำผ่านสระ ต้องมีการศึกษาคุณภาพน้ำผิวดินที่ใช้เติมและคุณภาพน้ำบาดาลเบื้องต้นของพื้นที่นั้นๆ ว่ามีสารปนเปื้อนที่อาจกระทบต่อสิ่งแวดล้อม กระทบต่อการใช้น้ำเพื่อการเกษตรหรือการอุปโภคบริโภคหรือไม่ การเก็บตัวอย่างน้ำต้องดำเนินการตามหลักวิชาการและส่งวิเคราะห์กับห้องปฏิบัติการมาตรฐาน โดยวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ไอออนหลัก โลหะหนัก ปุ๋ย สารกำจัดวัชพืช อินทรียสาร รวมทั้งจุลินทรีย์ที่ก่อเชื้อโรค มีการติดตามตรวจสอบทั้งคุณภาพน้ำที่ใช้เติมและน้ำบาดาลเพื่อศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเติมน้ำ รวมทั้งขอบเขตการปนเปื้อนในน้ำบาดาล

4) ผลกระทบเนื่องจากการขยายผลการศึกษาให้ครอบคลุมพื้นที่และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม สำหรับน้ำผิวดินที่ใช้เติมในพื้นที่นำร่องบ้านหนองนานับว่ามีปริมาณน้อยมากคือมีปริมาณเพียง 28,000 ลบ.ม.ในช่วงฤดูฝน และทั้งปีมีปริมาณเพียง 100,000 ลบ.ม. ซึ่งจะไม่สร้างผลกระทบเสียหายต่อระบบน้ำบาดาลหากมีการเติมน้ำผ่านสระเมื่อเทียบกับการเติมน้ำทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง ดังนั้นการขยายผลการเติมน้ำให้ครอบคลุมทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำควรพิจารณาประเด็นที่สำคัญดังนี้

(4.1) การเติมน้ำเพื่อรักษาสมดุลหรือเพื่อยกระดับน้ำบาดาลขึ้น 2 ม. อาจต้องใช้ระบบเติมน้ำประมาณ 700 แห่ง จึงต้องศึกษาวิธีดำเนินงานที่ไม่ส่งผลกระทบทั้งด้านเศรษฐกิจและสังคมต่อผู้ใช้น้ำด้านท้ายน้ำ

(4.2) กำหนดรูปแบบการใช้น้ำจากระบบการจัดการเติมน้ำเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ควรมีหน่วยงานหลักในการจัดเตรียมระบบเติมน้ำ การจัดการระบบเติมน้ำแบบเต็มระบบเพื่อช่วยลดพื้นที่เสี่ยงน้ำท่วมในพื้นที่ท้ายน้ำ

(4.3) การประเมินทรัพยากรแหล่งน้ำผิวดินเพื่อให้ทราบถึงปริมาณการไหลของน้ำผิวดินและช่วงเวลาที่มีปริมาณน้ำสูงสุดในแต่ละปี เพื่อกำหนดช่วงเวลาเติมน้ำได้อย่างเหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

กรมชลประทาน, 2540. การศึกษาเพื่อหาวิธีเหมาะสมเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำสำรองทางการเกษตร, โครงการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อการชลประทาน อำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย, เสนอโดย บริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ จำกัด และ Tahal Consulting Engineers LTD.

กรมชลประทาน, 2546. โครงการศึกษาเพื่อทำแผนหลักรองรับการพัฒนาแหล่งน้ำและปรับปรุงโครงการชลประทาน สำหรับแผนฯ 9, กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรธรณี, 2519. แผนที่ธรณีวิทยา มาตราส่วน 1 : 250,000, กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.

กรมทรัพยากรธรณี, 2529. รายงานวิชาการ ฉบับที่ สธว. 23/2529, สำนักธรณีวิทยา, กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรธรณี, 2539. แผนที่น้ำบาดาลจังหวัดสุโขทัย พิจิตร และพิษณุโลก, กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.

กรมทรัพยากรธรณี, 2543. โครงการสำรวจออกแบบการระบายน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล พื้นที่ลุ่มน้ำแม่อาว จังหวัดลำพูน, เสนอโดยบริษัท วอเตอร์ รีซอร์ช เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด.

กรมทรัพยากรธรณี, 2544. ธรณีวิทยาประเทศไทย, เฉลิมพระเกียรติพระบาทมเด็จพระเจ้าอยู่หัวเนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคล เฉลิมพระชนพรรษา 6 รอบ 5 ธันวาคม 2542, กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม, หน้า 199.

กรมทรัพยากรธรณี, 2545. โครงการศึกษาประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ ระยะที่ 3 และการสำรวจออกแบบระบบเติมน้ำ, เสนอโดยบริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ จำกัด และ Tahal Consulting Engineers LTD.

กรมทรัพยากรธรณี, 2549. รายงานวิชาการ ฉบับที่ สธว. 23/2549, กรุงเทพฯ: สำนักธรณีวิทยา,

กรมทรัพยากรธรณี, 2551. แผนที่ธรณีวิทยา มาตราส่วน 1: 50,000 ระวางอำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร (4942 II) ระวางอำเภอวชิรบารมี จังหวัดพิจิตร (5042 III), กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2548. โครงการศึกษาออกแบบก่อสร้างระบบเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล พื้นที่ลุ่มแม่น้ำชายฝั่งตะวันออก, เสนอโดยบริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ จำกัด.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2549. การศึกษาการใช้น้ำบาดาลร่วมกับน้ำผิวดินบริเวณภาคกลางตอนบน, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2550.รายงานวัดระดับน้ำบ่อสังเกตการณ์ภาคเหนือ, กรุงเทพฯ: สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (เล่มที่ 10/10), เสนอโดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น.

กรมพัฒนาที่ดิน, 2543. แผนที่กลุ่มชุดดิน มาตราส่วน 1:50,000 (รายงานการใช้ประโยชน์ที่ดินรายจังหวัด), กรุงเทพฯ.

กรมโยธาธิการ, 2541 ก. การศึกษาทดลองอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินบริเวณจังหวัดกำแพงเพชร, เสนอโดยศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กรมโยธาธิการ, 2541 ข. การศึกษาความเหมาะสมด้านวิศวกรรมโครงการอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินจังหวัดสุโขทัย โดยศูนย์บริการวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กรมอุตุนิยมวิทยา, 2552. ข้อมูลสภาพอากาศจังหวัดพิษณุโลก พิจิตร และสุโขทัย ปี 2540-2550, กรุงเทพฯ.

กรมอุตุนิยมวิทยา, 2553. ข้อมูลสภาพอากาศจังหวัดกำแพงเพชร ปี 2543-2552, กรุงเทพฯ.

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20, 2543. กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น, ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิชัย ศรีบุญลือ, 2552. อุทกวิทยา. ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร, 2552. แผนที่แสดงน้ำท่วมตั้งแต่เดือนพฤษภาคม - ตุลาคม 2549, http://www.thaiwater.net/current/FloodAugToSep49.html

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2552. Gross Provincial Product (2009 Edition), http://www.nesdb.go.th/

สุจยา ยอดเพชร และเดชา นาวานุเคราะห์, 2544. การศึกษาคุณภาพน้ำแม่น้ำยม, วารสารวิจัยและฝึกอบรม พ.ค.-ส.ค. 2544, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. หน้า 21-32.

Abu-Taleb, M. F., 2003. Recharge of Ground-Water through Multi-Stage Reservoirs in a Desert Basin, Environmental Geology, 44:379-390.

Akan, A.O., 2006. Open Channel Hydraulics, Amsterdam: Elsevier.

American Society of Civil Engineers, 2001. Standard Guidelines for Artificial Recharge of Ground Water, EWRI/ASCE 34-01. ISBN: 0784405484.

Anbazhagan, S., Ramasamy, S.M., and Gupta, D.S., 2005. Remote Sensing and GIS for Artificial Recharge Study, Runoff Estimation and Planning in Ayyar Basin, Tamil Nadu. India Environ Geol, 48: 158-170.

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

Asano, T. 1985. Artificial Recharge of Ground-water, Butterworth Publishers, Boston, 767 pp.

Bavor, H.J., and Mitchell, D.S. 1994. Wetland Systems in Water Pollution Control [Eds.], Water Sci. Technol. 29(4), 336p.

Boogaard, F., Bruins, G., and Wentink, R., 2006. Wadi's: Aanbevelingen Voor Ontwerp, Aanleg en Beheer, Stichting RIONED.

Botzan, T.M., Necula, A.I., Marino, M.A., and Basa-gaoglu, H. 1999. Benefit-Cost Model for an Artificial Recharge Scenario in the San Joaquin Valley, California, Water Resources Management 13: 189-203.

Bouwer, H., 2002. Artificial Recharge of Groundwater: Hydrogeology and Engineering, Hydrogeology Journal, 10:121–142.

Bouwer, H., and Rice, R. C. 1989. Effect of Water Depth in Groundwater Recharge Basins on Infiltration Rate, Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 115(4): 556-568.

Braskerud, B.C. 2003. Clay particle retention in small constructed wetlands, Water Research 37 (2003) 3793–3802.

Brown, C.J., Hatfield, K., Newman M. 2006. Lessons Learned from a Review of 50 ASR Projects from the United States, England, Australia, India, and Africa, 2006 UCOWR Annual Conference Increasing Freshwater Supplies, Santa Fe, New Mexico, USA.

California Department of Water Resources (CDWR). 1991. California Well Standards, Water Wells, Monitoring Wells, Cathodic Protection Wells, Bulletin 74-90, Sacramento, CA.

Central Arizona Project. 2009. Agua Fria Recharge Project, Operations, http//:www.cap-az.com/operations/recharge/aguafria

Central Ground Water Board. 2000. Guide on Artificial Recharge to Ground Water, Ministry of Water Resources, New Delhi, May, 2000.

Central Groundwater Board. 2002. Master Plan for Artificial Recharge to Ground Water in India. Ministry of Water Resources, New Delhi, India.

Cruise, J.F., Sherif, M.M., and Singh, V. 2007. Elementary Hydraulics. Toronto, Thomson/ Nelson.

Dillon, P.J. 2005. Future Management of Aquifer Recharge, Hydrogeol J (2005) 13:313–316.

Dillon, P.J. and Molloy, R. 2006. Developing Aquifer Storage and Recovery (ASR) Opportunities in Melbourne, Technical Guidance for ASR, CSIRO Land and Water Science Report 4/06.

Dillon, P.J. and Pavelic, P. 1996. Guidelines on the quality of stormwater and treated wastewater for injection into aquifers for storage and reuse. Urban Water Research Association of Australia Research Report No. 109.

Dillon, P.J., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., and Ward, J. 2009. Managed Aquifer Recharge: An Introduction, Waterlines Report Series No. 13, Australia: the National Water Commission.

Domenico, P.A., and Schwartz, F.W. 1998. Physical and Chemical Hydrogeology, New York: John Wiley and Sons, 824 p.

Donovan, D.J., Katzer, T., Brothers, K., Cole, E., and Johnson, M. 2002. Cost-Benefit Analysis of Artificial Recharge in Las Vegas Valley, Nevada, J. Water Resour. Plng. and Mgmt., 128 (5): 356-365.

Dyhouse, G., Hatchett, J., and Benn, J. 2003. Floodplain Modeling using HEC-RAS, Waterbury,Conn.: Haestad Press.

Esfandiari-Baiat, M., and Rahbar, G. 2004. Monitoring of Inflow and Outflow Rate from Kaftari Artificial Recharge of Groundwater System in Dorz-Sayban Region in South-Eastern Iran.

FAO. 1992. Crop Water Requirements (Paper No 24), Rome.

FAO. 1998. Irrigation and Drainage (Paper No 56), Rome.

FAO. 2009. Infiltration Rate and Infiltration Test, Annex 2, http://www.fao.org/docrep/

Farr, E., and Henderson, W.C., 1986. Land Drainage, Longman Group Limited, New York.

Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO). 1984. Irrigation and Drainage (Paper No 24), Rome.

Fotheringham, S., Rogerson, P., 1995. Spatial Analysis and GIS, Taylor & Francis, London.

Fowler, L.C. 1995. Operation and maintenance of ground water facilities. American Society of Civil Engineers.

Ghayoumian, J., Mohseni Saravi, M., Feiznia, S., Nouri, B., and Malekian, A. 2007. Application of GIS Techniques to Determine Areas Most Suitable for Artificial Groundwater Recharge in a Coastal Aquifer in Southern Iran, Journal of Asian Earth Sciences, 30: 364–374.

Guymon, G.L. 1994. Unsaturated Zone Hydrology, New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 210 pp.

Hammer, D.A. 1989. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural, Lewis Publishers, 831p.

Hansen, C.V. and Aucott, W.R. 2000. Status of Groundwater Level and Storage Volume in the Equus Beds Aquifer Near Wichita Kansas, January 2000-2003: U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 03-4298.

Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G. 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process, U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-92.

Harrington, C.A., Scholz, M., Heal, K., Keohane, J., Dunne, E., Gouriveau, F. and Mustafa, A. 2008. Constructed Farm Wetlands (CFW): Design Manual for Scotland and Northern Ireland. Report Prepared for the Northern Ireland Environment Agency and the Scottish Environment Protection Agency.

Hua, G.F., Zhua, W., Zhao, L.F., and Huang, J.Y. 2010. Clogging Pattern in Vertical-Flow Constructed Wetlands: Insight from a Laboratory Study, Journal of Hazardous Materials 180: 668-674.

Hydraulic Engineering Center, 2001. HEC-RAS River Analysis System, Users Manual, U.S. Army Corps of Engineers.

Jain, S.C. 2001. Open-Channel Flow, New York: Wiley.

Kadlec, R.H. and Knight, R.L. 1996. Treatment Wetlands, Florida: CRC Press, Inc.

Kahlown, M A. 2004. Leaky Dam to Rejuvenate Depleting Aquifers in Balochistan.

Kantawanichkul, S., Karnchanawong, S., and Jing, S.R. 2009. Treatment of Fermented Fish Production Wastewater by Constructed Wetland System in Thailand, Chiang Mai J. of Sci. Vol. 36(2) : 149-157.

McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chap. A1.

McDowell-Boyer, L.M., Hunt, J.R., and Sitar, N. 1986. Particle Transport through Porous Media, Water Resources Research, 22(13) 1901-21.

Mousavi, S.F., and Rezai, V. 1999. Evaluation of Scraping Treatments to Restore Initial Infiltration Capacity of Three Artificial Recharge Projects in Central Iran, Hydro-geology Journal, 7:490-500.

Murray,R., Tedoux, G., Ravenscroft, P., and Botha, F. 2007. Artificial Recharge Strategy, version 1.3, Department of Water Affairs and Forestry and Water Research Commission, South Africa.

Nadee, S., Srisuk, K., Sarapirom, P., Pavelic, P. and Uppasit, S. 2010. Field and Laboratory Experiments to Investigate Infiltration Processes and Clogging Effects from a Ponding Recharge System at Ban Nong Na, Bangrakum District, Phitsanulok Province, Lower Yom River Basin, Thailand, International Symposium on Managed Aquifer Recharge 7th, October 9-13, 2010. Abu Dhabi, United Arab Emirates.

Nissen-Petersen, E. 2006. Water from Roads, ASAL Consultants Ltd. for Danida in Kenia (Danish International Development Assistance), www.waterforaridland.com

OHL Brasil. 2007. Programa via de las agues, desarrollado por la concesionaria autovias, http://www.wbcsd.org/web/e3/partnerships/7Oct_WCF_BusinessNightSchoolPartnerships_ViadelasAguas.pdf

Oosterhuis, M., and Foekema, E. 2003. Bodembelasting van metalen in infiltratievoor-zieningen is gering, H2O. Volume 21; pp 24-26.

Page, D., Dillon, P.J., Purdie, M. and Rinck-Pfeiffer, S. 2006. A Risk Management Method for Stormwater Re-use. In: Delectic, A. and Fletcher, T. [Eds]. Proc. 7th International Conference on Urban Drainage Modelling and the 4th International Conference on Water Sensitive Urban Design; Book of Proceedings. Monash University, Clayton, Victoria, Australia, pp. 612-619.

Pavelic, P. 1996. International Experience: Aquifer Storage and Recovery, Section 1.

Pavelic, P. 2009. Advancements in Research and Adoption of Managed Aquifer Recharge in Australia.

Pavelic, P., Dillon, P.J., Barry, K.E., Vanderzalm, J.L., Correll, R.L., and Rinck-Pfeiffer, S.M. 2007. Water Quality Effects on Clogging Rates during Reclaimed Water ASR in Carbonate Aquifer, Journal of Hydrology, 334:1-16.

Pérez-Paricio, A. And Carrera, J., 1999. Clogging Handbook, EU Project on Artificial Recharge of Groundwater, Contract ENV4-CT95-0071, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain.

Poehrich, T. 1997. Aquifer Test for Window Version 2.5, Waterloo Hydrogeologic Inc.

Prommer, H. 2006. A Reactive Multicomponent Transport Model for Saturated Porous Media User's Manual Version 1.46.

Prudic, D.E. 1989. Document of a Computer Program to Simulate Stream-Aquifer Ralations using a Modular, Finite Difference, Groundwater Flow Model, U.S. Geological Survey, Open file report 88-729, 113 pp.

Prudic, D.E., Konikow, L.F., and Banta, E.R. 2004. A New Streamflow-Routing (SFR1) Package to Simulate Stream-Aquifer Interaction with MODFLOW-2000: U.S. Geological Survey Open file report 2004-1042.

Roberson, J.A., Cassidy, J.J., and Chaudry, M.H., 1998. Hydraulic Engineering, New York: Wiley.

Roehrich, T. 1997. Aquifer Test for Windows, version 2.54, Waterloo Hydrogeologic Inc.

Roscoe Moss Company, 1990. Handbook of Ground Water Development, Los Angeles: John Wiley & Sons, Inc.

s8684e/s8684e0a.htm.

Saraf, A., Kundu, P., and Sarma, B. 2004. Integrated Remote Sensing and GIS in Groundwater Recharge Investigation and Selection of Artificial Recharge Sites in a Hard Rock Terrain, Department of Earth Sciences, Indian Institute of Technology, Roorkee, ROORKEE-247667, India.

Saraf, A., Kundu, P., and Sarma, B. 2009. Integrated Remote Sensing and GIS in Groundwater Recharge Investigation and Selection of Artificial Recharge Sites in a Hard Rock Terrain, Department of Earth Sciences, Indian Institute of Technology, Roorkee, ROORKEE-247667, India.

Saykawlar, S., Sitiyod, P., Tiankham, K., and Meemotgit, W. 2000. Data Integration of Artificial Recharge for Sukhothai Groundwater Project, Zone I, Thailand, Symposium on Mineral, Energy, and Water Resources of Thailand : Toward the year 2000, October 28-29, 1999, Bangkok, Thailand.

Schlumberger Water Services. 2008. Visual MODFLOW Premium 4.3 User's Manual, Waterloo, Ontario, Canada.

Schmidt Ross, H.C, Ziegler, A.C., and Parkhurst, D.L. 2007. Geochemical Effects of Induced Stream-Water and Artificial Recharge on the Equus Beds Aquifer, South-Central Kansas, 1995-2004, USGS Scientific Investigations Report 2007-5025.

Schroeder, P. R., Lloyd, C.M., and Zappi, P.A. 1994. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP3) Model, Risk Reduction Engineering Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, OHIO, USA.

Srisuk, K., and Sriboonlue, V. 1997. Conceptual Groundwater Model for Saline Water and Saline Soils in the Chi-Mun Basin, Northeast Thailand, International Symposium on Hydrology and Water Resources for Research and Development in Southeast Asia and the Pacific at Mekong Royal Hotel, Nong Khai, Thailand, 16-19 December 1997, p. 235-253.

Todd, D.K., 1982. Groundwater Hydrology, 2ed. John Wiley and Sons, 535p.

Toth, J. 1986. Regional groundwater theory, consequences, applications. World Federation of Hungarians, Hungarian Academy of Sciences, Federation of Technical and Scientific Societies. Budapest, Hungary.

Toth, J., 1963. A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in a Small Drainage Basin: Jour. Geophys, Res, v. 68, p. 4795-4812. Also in benchmark Papers in Geology v. 72 Physical Hydrogeology, ed. by Freeze, R. A. and W. Back, Hutchison Ross Pub. Co., 1983, p. 328-345.

van Steenbergen, F., and Tuinhof, A. 2009. Managing the Water Buffer for Development and Climate Change Adaptation; Groundwater Recharge, Retention, Reuse and Rainwater Storage, International Hydrological Programme (IHP) of UNESCO.

Wu, J., Wu, Y., Lu, J., and Lee, L. 2007. Field Investigations and Laboratory Simulation of Clogging in Lixi Dam of Jinduicheng, China, Environ. Geol. 53:387-397.

Wu, Y., Tang Y., and Chengmin, H. 2009. Harvesting of Rainwater and Brooklets Water to Increase Mountain Agricultural Productivity: A Case Study from a Dry Valley of Southwestern China, Natural Resources Forum, 33, 1, 39 -48.

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.

Department of Groundwater Resources
Ministry of Natural Resources & Environment

Pilot Study and Experiment on Managed Aquifer Recharge Using Ponding System in the Lower North Region River Basin, Phitsanulok, Sukhothai, and Pichit Provinces

Final Report

Executive Summary Report

Prepared by

Khon Kaen University

March 2011

Executive Summary Report

Project Funding:

Department of Groundwater Resources
Ministry of Natural Resources and Environment

Preparation:

Groundwater Research Center, Khon Kaen University,
Ministry of Education

Project Advisory Board:

Mr. Praneet Roibang	Director General, Department of Groundwater Resources
Mr. Supot Jemsawatdipong	Deputy Director General, Department of Groundwater Resources
Mr. Sumrit Chussanatus	Deputy Director General, Department of Groundwater Resources

Contracting Committee:

Mr. Sumrit Chussanatus	Chairman
Mr. Prasert Mumak	Member
Mr. Sukree buranasan	Member
Ms. Rattanawadee Khosol	Member
Mr. Kraisorn Sangkajan	Member

Project Inspection Committee:

Mr. Sitisak Munyou	Chairman
Dr. Kriangsak Pirarai	Member
Ms. Anchalee Pongsatitpat	Member
Mrs. Saowani Sangkajan	Member
Ms. Urai Bangyeekhan	Member

Project Team

Assoc. Prof. Dr. Kriengsak Srisuk	Project Leader and Expert in Hydrogeology and groundwater modeling
Mr. Somchai Wongsawat	Project Deputy Leader and Expert in Hydrogeology
Mr. Withit Siriphocagit	Advisor in Hydrogeology
Dr. Tawisak Silakul	Advisor in Geophysics
Dr. Paul Pavelic	Expert in Groundwater Recharge System Management
Mr. Charoen Chuamthaisong	Expert in Design and Construction of Recharge Pond
Assoc. Prof. Dr.Vichai Sriboonlue	Expert in Water Resources Engineering
Mr. Teerawash Intrasuta	Expert in Hydrogeology
Mr. Theerasak Tangsutthinon	Expert in Hydrogeology
Asst. Prof. Laa Archwichai	Expert in Geology
Mr. Jade Julawong	Expert in Geophysics
Dr. Kritika Trakoolngam	Expert in Environmental Engineering
Mr. Phayom Sarapirom	Expert in Civil Engineering
Mr. Kasem Jitayarnun	Field Project Coordinator
Ms. Kewaree Pholkern	Project Academic Coordinator and Water Resources Engineer
Mr. Suwanchai Nadee	Soil and Water Engineering Researcher
Ms. Thidarat Cotanont	Hydrogeologist
Ms. Sirirat Uppasit	Hydrogeologist
Mr. Prayuth Senchai	Hydrogeologist
Ms. Penlada Boonsongka	Hydrogeologist
Mr. Surapat Sangtaweep	Hydrogeologist
Ms. Apinya Injun	Hydrogeologist

Project Summary

The Groundwater Research Center (GWRC), Khon Kaen University, was awarded a contracted research by the Department of Groundwater Resources (DGR) to study on the project "Pilot Study and Experiment on Managed Aquifer Recharge Using Ponding System in the Lower North Region River Basin, Phitsanulok, Sukhothai, and Pichit Provinces". The project duration was between April, B.E. 2552 and April, B.E. 2554. The project objectives are to: 1) study and experiment on the artificial groundwater recharge using recharge pond system or other artificial recharge methods; 2) study the physical processes, hydraulic characteristics, and chemical processes in artificial recharge; 3) provide guidelines for integrated mitigations of drought and flood hazards; 4) apply the research results to provide guidelines for the project operation; and 5) generate the knowledge body and transfer of technology.

The project activities consist of the essential tasks such as the study on hydrogeology of the study areas, groundwater uses, selection of suitable project site, experiment on artificial recharge using recharge pond, study on economic feasibility, study on the guidelines for groundwater artificial recharge master plan formulation for the mitigation of the groundwater level decline, training seminar for the related DGR personnel and interested people, and project conference for dissimination of research results.

The study areas were separated- considering consecutive area zooming-in technique- into 5 scales, namely; 1) the Lower North Region River Basin areas of about 13.31 million Rais (21,300 square kilometers) covering the areas of Phitsanulok, sukhothai, and Pichit Provinces; 2) regional study areas of about 600,000 Rais (972 square kilometers) covering the areas to the west of the Yom River; 3) detailed study areas of about 7,500 Rais (12 square kilometers) covering the areas of Lan Ba watershed; 4) Ban Nong Na pilot project areas of approximately 2,575 Rais (4.12 square kilometers); and 5) construction site for the artificial recharge pond system of about 8 Rais (0.01 square kilometer). The site is located at Ban Nong Na, Moo 8, Nong Kula Sub-District, Bang Rakam District, Phitsanulok Province.

The results of the study show that the large shallow aquifers in the Lower North Region River Basin consist of layers of sands and gravels of the River Yom and Nan. Farmers extract shallow groundwater from shallow aquifers- ranging in depths from 10 -15 meters from ground surface- for rice growing at about 7,500 million cubic meters per year and generate income of about 25,000 million Baht per year. During the last decade, groundwater levels have been continuously declined at the rates of approximately 10 – 25 centimeter per year resulting in the occurrence of approximately 6.6 million Rais (10,560 sq. kilometers) of the groundwater critical areas with groundwater levels deeper than 8 meters from the surface. If the

groundwater pumping is continued at the same rate without any problem mitigation measures, the groundwater critical areas would increase approximately 100,000 Rais (160 sq.kilometers) and the groundwater levels would be 1.0 -2.5 meters deeper than the initial levels within the next 10 years.

At present, most farmers lower the pumping well head (well sink) to 4 -10 meters from ground surface in order to achieve the pumping capacity. The well head sinking practice leads to accumulative increasing expenses for well sink construction and pumping costs - due to continuous decline of groundwater levels- of about 4,300 million Baht within the next 10 years and that about 16,000 million Baht within the next 20 years.

The experiment, design and construction as well as the testing of artificial recharge using recharge pond system were carried out in the selected area of 8 Rais. The artificial recharge pond system consists of raw water diversion, constructed wetland for raw water quality treatment, recharge ponds (1 Rai or 1,600 sq. m.), and monitoring system. The results of the experiment show that the constructed wetland could remove water turbidity of about 70 % of the initial inlet turbidity. The recharge ponds could recharge the drainage water approximately 26,000 cubic meters during the wet season. The recharged water would be recoverable for rice growing covering the area of 16 Rais. The infiltration rate is found varying from 0.05 – 0.20 meter per day or the recharge rate of 60 – 2,460 cubic meters per day per sq. meter. The monitoring of the groundwater quality in the experiment area shows no water quality impacts.

The assessment of the economic feasibility of the pilot artificial recharge system using the benefit-cost analysis showed that if the project is extend for implementation in other areas the recharge system would be economical feasible when the recharge system has the area of at least 5 Rais to achieve the investment costs within 4 years. The recharge system in the area larger than 10 Rais has much higher benefit-cost ratio than smaller one and would achieve the investment costs in 3 years.

Mathematical groundwater modelings were simulated to obtain the groundwater recharge planning. The simulation results showed that approximately 5 – 55 percent of the natural recharges to shallow groundwater were derived from rainfalls. This recharged water is not adequate for groundwater extraction for agricultural uses. To achieve the groundwater balance in the next 10 years, artificial recharge using recharge ponds of 8,000 Rais together with abandoned sand pits of 2,550 Rais should be carried out. These recharge operations would benefit the farming areas of 146,700 Rais with 10 years investment costs of 3,170 million Baht and farmers could generate incomes of about 11,200 million Baht from using recovered groundwater for rice growing. Artificial groundwater recharge in the groundwater

critical areas to raise 2 meters of groundwater level, the recharge areas of 18,900 Rais are required in order to achieve the annual groundwater recharge of 1,044 million cubic meters. The beneficial areas would be about 365,000 Rais. The investment costs would be approximately 4,830 million Baht and farmers obtain the incomes of 27,850 million Baht per year. In addition, the recharge operations would mitigate the problems- in 20 districts - of repeated droughts and flooding hazards. The quantity of 1,400 million cubic meters per year of surface runoff water into the major rivers would be reduced and about 2 million Rais (3,200 sq.m.) of flooded areas would be alleviated.

The artificial groundwater recharge could be used to solve the problems of groundwater level decline and those of the drought and flooding hazards. To promote and extend the implementation of the projects in other areas, the artificial groundwater recharge integrated master plans should be developed for the groundwater level critical areas. The Department of Groundwater Resources should be the host organization for groundwater academic supports and co-operations with various related responsible government agencies to encourage and extend the implementation of the artificial groundwater recharge activities such as:

1) rivers dredging or highways side ditches excavation to sand layer to increase the drainage efficiency and enhance recharge to groundwater by local government agencies, Royal Irrigation Department, Department of Highways and Department of Rural Roads: 2) accelerate the construction of storage reservoirs in the upper high land up stream areas by the Royal Irrigation Department; 3) accelerate the expansion of construction of check dams in the forest and national park areas by the Department of Forestry, Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation; 4) accelerate the artificial recharge in the repeated drought hazard areas by the local government organizations; 5) encourage and support the recharge from rainwater harvesting in the government official offices; and 6) conserve and develop the areas for natural recharge such as abandoned sand pits, public drainages and canals by the local government organizations.

In addition, the Department of Groundwater Resources should create the awareness and establish knowledge and values of groundwater and artificial groundwater recharge together with the development of groundwater recharge master plans to be a part of the national water resources management. The success of the development of the artificial recharge system in the future would be based on the project implementation according to the recharge master plans and systematic recharge development established from various aspects of researches. These include raw water quality treatment, groundwater hydraulics, groundwater quality, selection of suitable artificial recharge methods, prevention of clogging of recharge ponds, operation and maintenance, and feasibility of project economy and environments.

CONTENTS

		Page
Project Summary		**c**
Chapter 1	**Introduction**	**1-1**
1.1	Background and Rationale	1-1
1.2	Objectives	1-1
1.3	Project Working Protocol	1-2
Chapter 2	**Groundwater Recharge**	**2-1**
2.1	Principles of Managed Aquifer Recharge	2-1
2.2	Methods of Managed Aquifer Recharge	2-1
2.3	Decision on Development of a Managed Aquifer Recharge System	2-3
2.4	Development of Managed Aquifer Recharge	2-3
Chapter 3	**The Study Area**	**3-1**
3.1	Selection of the Study Area	3-1
3.2	Hydrogeologic Conditions	3-2
	3.2.1 The Lower North Region River Basin Area	3-2
	3.2.2 Regional Study Area	3-2
	3.2.3 Detailed Study Area	3-7
	3.2.4 Ban Nong Na Pilot Project Area	3-7
	3.2.5 Recharge Pond System Construction Area	3-8
3.3	Mathematical Groundwater Flow Modeling	3-11
	3.3.1 Modeling Objectives	3-11
	3.3.2 Model Parameters Calibration	3-12
	3.3.3 Parameters Sensitivity Analysis	3-12
	3.3.4 Modeling Results	3-12
3.4	Important Issues	3-15
Chapter 4	**Experiment of Artificial Recharge and Preliminary Evaluation of Project Cost-Benefit**	**4-1**
4.1	Design and Construction of Recharge System	4-1
	4.1.1 Design of Recharge System	4-1
	4.1.2 Construction of Recharge System	4-1
4.2	Experiment of Raw Water Treatment System	4-3

CONTENTS (continued)

		Page
4.3	Recharge Experiment	4-4
	4.3.1 Filtration Experiment in Laboratory and Small Scale Recharge Pond	4-4
	4.3.2 Recharge Pond Experiment	4-4
4.4	Monitoring of Groundwater Level and Groundwater Quality Impacts	4-5
4.5	Operation and Maintenance of Recharge Pond System	4-5
4.6	Preliminary Evaluation of Project Cost-Benefit	4-6
4.7	Important Issues	4-6
Chapter 5	**Guidelines for Groundwater Recharge Master Plans Formulation and Mitigation of Groundwater Level Decline Problem**	**5-1**
5.1	Master Plan Formulation Guidelines	5-1
	5.1.1 Components	5-1
	5.1.2 The Goal of the Master Plan	5-1
	5.1.3 Strategic Issues of the Groundwater Recharge Plan	5-2
	5.1.4 Strategy and Preliminary Action Plan	5-2
5.2	Guidelines for the Mitigation of Groundwater Level Decline Problem	5-5
	5.2.1 Guidelines for the Mitigation of Groundwater Level Decline Problem in Ban Nong Na Area and in the Regional Area	5-5
	5.2.2 Guidelines for the Mitigation of Groundwater Level Decline Problem in the Lower North Region River Basin Area	5-8
5.3	Integrated Development Plans for Artificial Recharge System	5-16
5.4	Important Issues	5-17
	5.4.1 Guidelines for Preparing Artificial Recharge Master Plans	5-17
	5.4.2 Guidelines for the Mitigation of Groundwater Level Decline Problem in the Study Area	5-17
Chapter 6	**Discussions and Recommendations**	**6-1**
References		**7-1**

FIGURES

Figure 1-1	Project working protocol	1-2
Figure 2-1	Methods of managed aquifer recharge in a watershed area	2-1
Figure 2-2	Methods of managed aquifer recharge	2-2
Figure 3-1	Steps for the selection of the study area	3-1
Figure 3-2	Topography and landuse conditions in the Lower North Region river basin	3-3
Figure 3-3	Hydrogeological map of the Lower North Region river basin area	3-4
Figure 3-4	Hydrogeological cross sections of the Lower North Region river basin area	3-5
Figure 3-5	Hydrogeological map of the lower Yom River Basin area	3-6
Figure 3-6	Hydrogeological map of the Lan Ba sub-watershed	3-9
Figure 3-7	Hydrogeological map of Ban Nong Na pilot project area	3-10
Figure 3-8	Results of groundwater flow simulation in Ban Nong Na pilot project area	3-13
Figure 3-9	Results of groundwater flow simulation in the regional study area	3-14
Figure 4-1	Componnents of recharge system	4-2
Figure 4-2	Relationship between the area of recharge pond system and benefit-cost ratio	4-7
Figure 5-1	Maps of groundwater level depths in the Ban Nong Na pilot project area	5-7
Figure 5-2	Maps of groundwater level depths in the regional study area	5-8
Figure 5-3	Maps of groundwater level depths in the Lower North Region river basin area	5-10
Figure 5-4	Procedure for selection of suitable artificial recharge methods	5-15

TABLES

Table 3-1	Ratio of agricultural water usage in Ban Nong Na pilot project area	3-8
Table 3-2	Model input data	3-11
Table 4-1	Suitability of various recharge pond systems	4-7
Table 5-1	Drought hazard districts that require recharge to raise 2 meters per year of groundwater level	5-11
Table 5-2	Districts receiving flood hazard mitigation from groundwater recharge	5-11
Table 5-3	Artificial recharge methods in the very high critical areas.	5-12
Table 5-4	Artificial recharge methods in the high critical areas.	5-13
Table 5-5	Artificial recharge methods in the intermediate critical areas.	5-14
Table 5-6	Factors for selection of artificial recharge methods	5-15
Table 5-7	Integrated development plans for artificial recharge system	5-16

FIGURES

Figure 1-1	Project working protocol	1-2
Figure 2-1	Methods of managed aquifer recharge in a watershed area	2-1
Figure 2-2	Methods of managed aquifer recharge	2-2
Figure 3-1	Steps for the selection of the study area	3-1
Figure 3-2	Topography and landuse conditions in the Lower North Region river basin	3-3
Figure 3-3	Hydrogeological map of the Lower North Region river basin area	3-4
Figure 3-4	Hydrogeological cross sections of the Lower North Region river basin area	3-5
Figure 3-5	Hydrogeological map of the lower Yom River Basin area	3-6
Figure 3-6	Hydrogeological map of the Lan Ba sub-watershed	3-9
Figure 3-7	Hydrogeological map of Ban Nong Na pilot project area	3-10
Figure 3-8	Results of groundwater flow simulation in Ban Nong Na pilot project area	3-13
Figure 3-9	Results of groundwater flow simulation in the regional study area	3-14
Figure 4-1	Componnents of recharge system	4-2
Figure 4-2	Relationship between the area of recharge pond system and benefit-cost ratio	4-7
Figure 5-1	Maps of groundwater level depths in the Ban Nong Na pilot project area	5-7
Figure 5-2	Maps of groundwater level depths in the regional study area	5-8
Figure 5-3	Maps of groundwater level depths in the Lower North Region river basin area	5-10
Figure 5-4	Procedure for selection of suitable artificial recharge methods	5-15

TABLES

Table 3-1	Ratio of agricultural water usage in Ban Nong Na pilot project area	3-8
Table 3-2	Model input data	3-11
Table 4-1	Suitability of various recharge pond systems	4-7
Table 5-1	Drought hazard districts that require recharge to raise 2 meters per year of groundwater level	5-11
Table 5-2	Districts receiving flood hazard mitigation from groundwater recharge	5-11
Table 5-3	Artificial recharge methods in the very high critical areas.	5-12
Table 5-4	Artificial recharge methods in the high critical areas.	5-13
Table 5-5	Artificial recharge methods in the intermediate critical areas.	5-14
Table 5-6	Factors for selection of artificial recharge methods	5-15
Table 5-7	Integrated development plans for artificial recharge system	5-16

Chapter 1
Introduction

1.1 Background and Rationale

The Lower North Region River Basin covers the administrative areas of Phichit, Phitsanulok, and Sukhothai Provinces where shallow groundwater from alluvial deposits has been heavily pumped for agricultural use for the past 10 years. The groundwater pumping leads to continuously decline of groundwater level at the rate of 10-20 cm per year. Most farmers have to lower the pump base installation level down to 4-10 m. below ground surface to achieve the pumping capacity. This practice causes continuously increasing cost for the pump installation and groundwater pumping. In addition, some areas of the Lower North Region River Basin suffer repeated flooding and drought hazards. To mitigate the above mentioned problems, the Department of Groundwater Resources (DGR) sets up a pilot experiment project to carry out the groundwater recharge using ponding recharge system. The groundwater recharge project will alleviate the groundwater level decline problem and mitigate water shortage problem by recharging surplus runoff water during the wet season into the shallow aquifer and recover for uses during the dry season. The project funding- from the National Groundwater Development Fund and by the DGR - is awarded to the Groundwater Research Center (GWRC), Khon Kaen University to carry out the study, design, construction, and aquifer recharge experiment using ponding recharge system so as to use the research results for project extensions and implementations in other suitable areas.

1.2 Objectives

The objectives of the project are:

1) To study and experiment on groundwater recharge using ponding system or other appropriate systems in a high potential and suitable site,

2) To study the physical, hydraulic, and chemical processes involved in groundwater recharge,

3) To mitigate draught hazard problem by using integrated surface water and groundwater in appropriate periods,

4) To conclude the results and findings of the research and provide operating guidelines for the groundwater recharge using ponding system for project expansion and implementation in other suitable areas in the future, and

5) To obtain technical and academic knowledge on groundwater recharge using ponding system for participatory technology transfer to the people and local administrative authorities.

1.3 Project Working Protocol

The study consists of the following main activities, namely, study on the physical environment and hydrogeological conditions, study on the groundwater usage, selection of the suitable area, groundwater recharge experiment, study on the guidelines for mitigation of groundwater level decline problem, training of related personnels from the DGR and interested people, and organizing participatory seminar for project information dissemination (Figure 1-1). The project began in April, B.E. 2552 (2009) and completed in April, B.E. 2554 (2011).

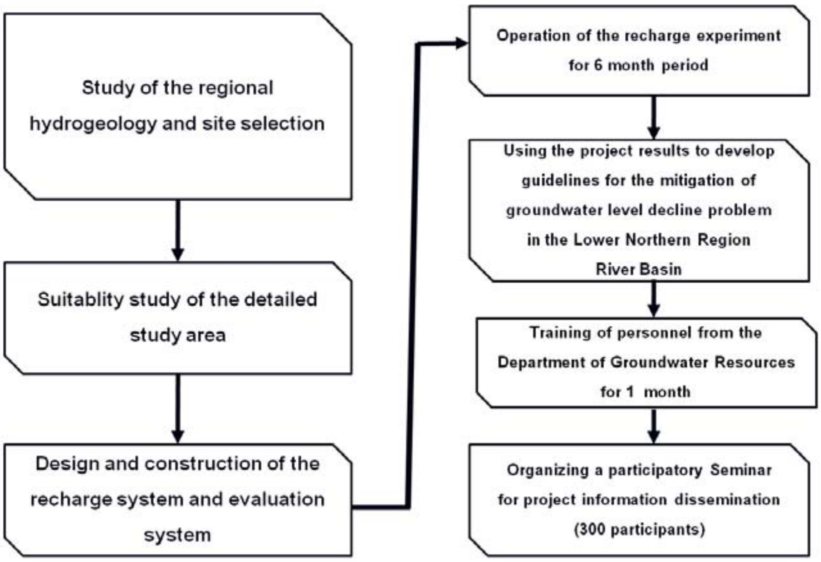


Figure 1-1 Project working protocol

Chapter 2
Groundwater Recharge

2.1 Principles of Managed Aquifer Recharge

Managed Aquifer Recharge (MAR) is the management of recharging groundwater into the aquifers in order to: (i) maintain the groundwater level or groundwater pressure, (ii) store and recover water for future specific spatial and temporal usage, (iii) conserve environment such as prevention of salt water intrusion or remediation of land subsidence (Dillon et al., 2009).

2.2 Methods of Managed Aquifer Recharge

Groundwater recharge must be conducted by methods suitable for each area. Methods of recharge depend on the aquifer characteristics, topography, land use, and groundwater usage. Figure 2-1 shows a groundwater recharge system, raw water source, and water recovery in the watershed area.

Methods of groundwater recharge and aquifer storage used at present are shown in Figure 2-2. The methods include (1) Aquifer Storage Recovery (ASR, or Aquifer Storage Transfer and Recovery, ASTR), (2) Dry Well, (3) Percolation Tanks, (4) Rainwater Harvesting, (5) Bank Filtration, (6) Infiltration Gallery, (7) Dune Filtration, (8) Infiltration Ponds, (9) Soil-Aquifer Treatment, (10) underground dam, (11) sand dam, and (12) recharge releases.

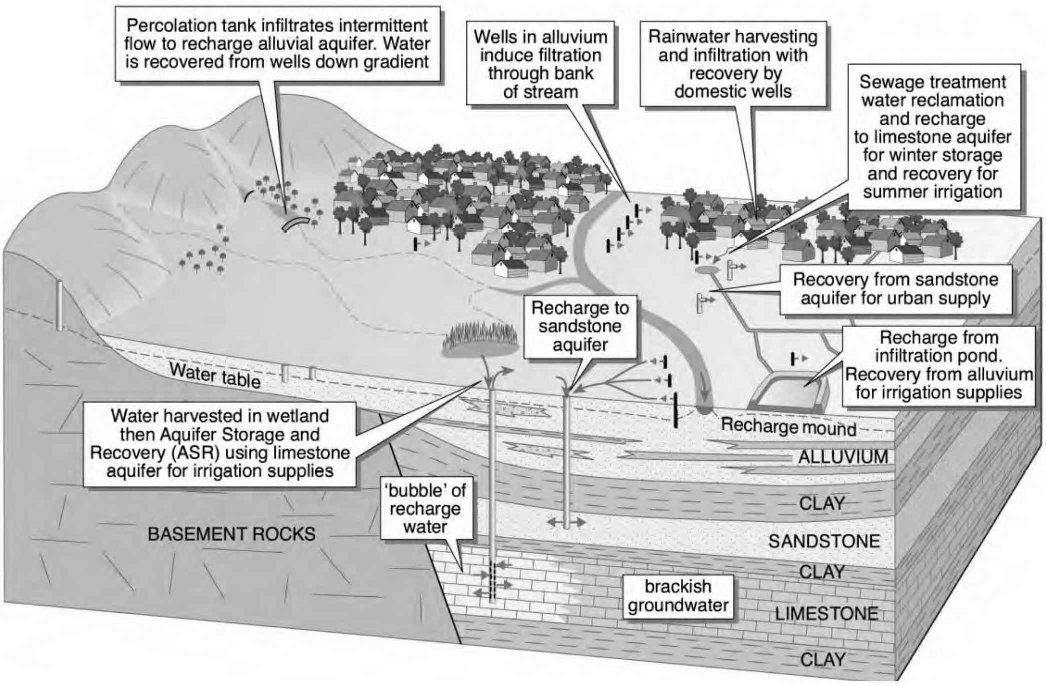


Figure 2-1 Methods of managed aquifer recharge in a watershed area (Dillon et al, 2009)

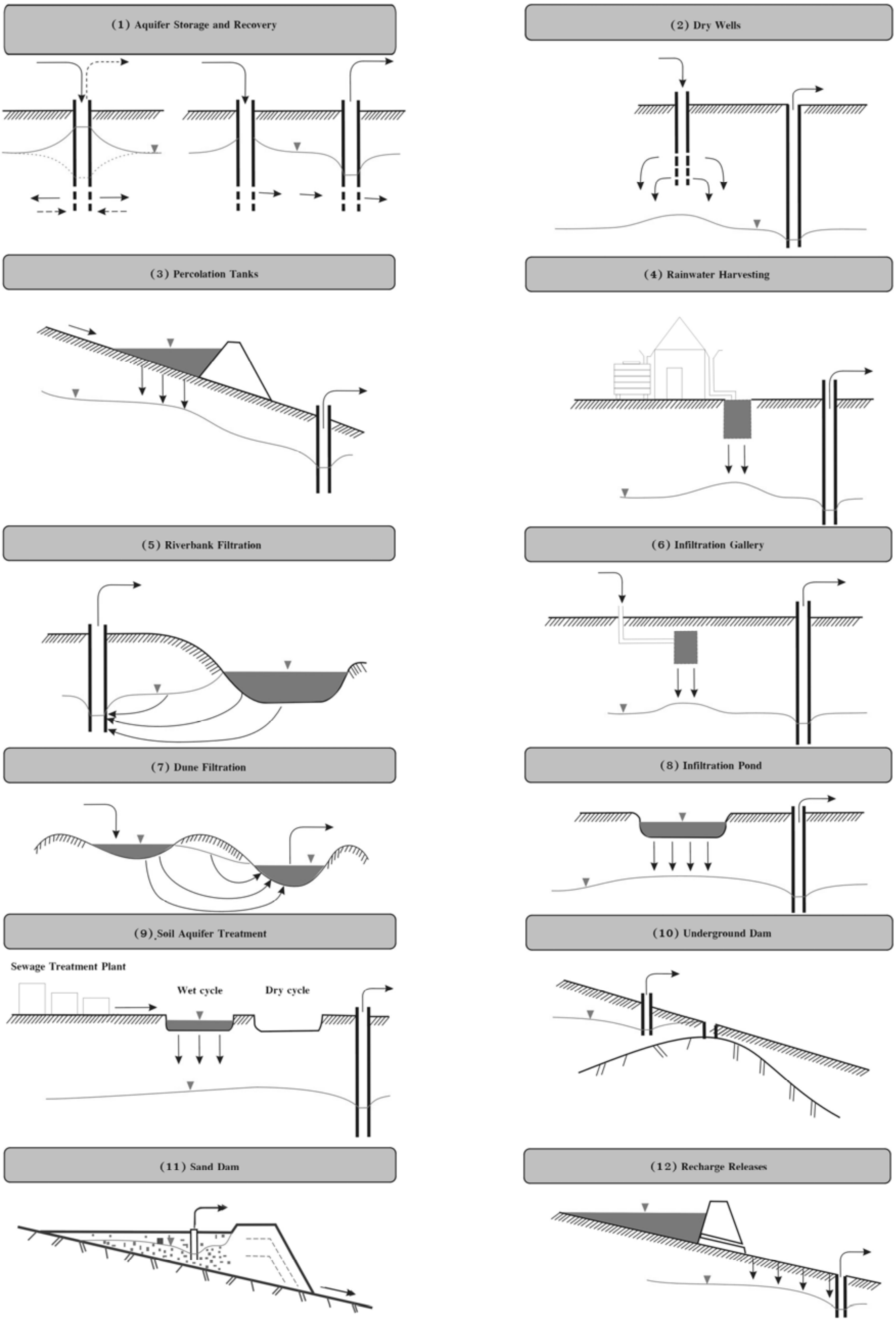


Figure 2-2 Methods of managed aquifer recharge (Dillon, 2005)

2.3 Decision on Development of a Managed Aquifer Recharge System

There are 5 factors to consider when deciding on developing a managed aquifer recharge system, these are, cost-benefit of the recovered water use, the availability of surface water for recharge, the suitability of the aquifer for groundwater storage and recovery, the sufficiency of the area for water harvesting and water treatment, and the potential of efficient project management. In Australia, where managed aquifer recharge has been developed for a long time, it was found that water storage by aquifer recharge has the lowest unit cost compared to other methods of water storage such as concrete tanks or rainwater collection tanks (Dillon et al, 2009).

2.4 Development of Managed Aquifer Recharge

The continuous increased groundwater usage in many parts of the world causes groundwater level decline in many areas. Recharging groundwater to solve the problem became widespread especially in the 19^{th} century. It was first implemented in Glasgow, Scotland, in 1810 and later became common in other areas of the world (Schmidt et al., 2007), such as those in the U.S., Israel, United Kingdom, Australia, India, Germany, South Africa, China, Korea, and Kenya.

In the U.S., managed aquifer recharge started in 1871 in Des Moines, Iowa. In the early 20^{th} century, recharge by spreading basin method became widespread in California, Arizona, Oregon, and Kansas. Aquifer Storage and Recovery (ASR) and Riverbank Filtration (RBF) systems via horizontal wells were widely used for groundwater conservation and for increasing water storage capacity. Development of managed aquifer recharge involved in various aspects both technically and legally. The U.S. Geological Survey (USGS) has intensively involved in developing the groundwater resources management system and has continuously participated in the management of managed aquifer recharge.

Development of managed aquifer recharge in Thailand was initiated by various organizations and many researches were conducted to find suitable development guidelines for different area-based conditions. However, continuing research is lacking and systematic project expansion is not yet implemented. The researches and demonstrating pilot projects are mainly carried out in the agricultural areas which large quantity of groundwater is extracted for cultivation. Some examples of the projects include: (1) The Study of Suitable Methods for Increasing Water Reserve for Agriculture in Sawankhalok District, Sukhothai Province. The study was conducted in B.E. 2539 – 2540 (1996-1997) to increase water reserve for agriculture in the areas of the Groundwater Development for Irrigation Project,;(2)

Investigation and Design of Infiltration into Aquifers in the Mae Ao River Basin, Lampun Province. The project was conducted by the Groundwater Resources Division, Department of Mineral Resources (DMR) in B.E. 2543 (2000); (3) Conservation and Restoration of Groundwater Resource Project in Phichit Province. The project was performed by the Department of Public Works (DPW) in B.E. 2541(1998) to study the engineering feasibility of conservation and restoration of groundwater resource in the Yom and Nan River flood plains located in the west and east of Phichit; (4) Conservation and Restoration of Groundwater Resource Project in Sukhothai carried out by the DPW in B.E. 2541(1998); (5) Study and Experiment on Conservation and Restoration of Groundwater Resource Project in Kamphaengphet Province. The project was conducted by the DPW in B.E. 2539-2541(1996-1998). The project area is located in the alluvial fan deposit to the south of Muang Kamphaengphet District; (6) Study and Evaluation of Groundwater Resource Potential in Tung Kula Ronghai Area: Phase III and Investigation and Design of Recharge System in Tung Kula Ronghai, the project was conducted by the DMR in B.E. 2545 (2002); (7) Study and Design of Groundwater Recharge Using the Aquifer Storage and Recovery (ASR) Method in the East Coast River Basin, the project was conducted by DGR in B.E. 2548 (2005); and (8) The Groundwater Recharge by Rainwater Harvesting at Bungkok Village, Bungkok Sub-District, Bang Rakam District, Phitsanulok Province and Nong Hu Chang Village, Ban Na Sub-District, Wachira Barami District , Phichit Province, the project was conducted by the DGR in B.E. 2550 (2007).

At present, the DGR continues to prepare the plans and produce research outputs to develop and expand the managed aquifer recharge in Thailand. The efforts are provided by funding pilot projects so as to establish existing sources for on-the-job learning and training as well as specifying measures, and producing guidelines and criteria to support the expansion of groundwater recharge projects systematically and efficiently; and having the important role in managing the country’s water resources.

Chapter 3
The Study Area

3.1 Selection of the Study Area

The selection of the study areas in this project could be separated into many selection levels from main river basin to recharge pond construction areas. The main selection factors include hydrogeological data and various environmental conditions. The Boolean selection method (Saraf, 2004) is used and the results are shown in Figure 3-1. The consecutive study areas include: 1) the Lower North Region river basin areas of about 13.31 million Rais (21,300 square kilometers) covering the areas of Phitsanulok, sukhothai, and Pichit Provinces; 2) regional study areas of about 0.61 million Rais (972 square kilometers) covering the areas to the west of the Yom River; 3) detailed study areas of about 7,500 Rais (12 square kilometers) covering the areas of Lan Ba watershed; 4) Ban Nong Na pilot project areas of approximately 2,500 Rais (4.12 square kilometers); and 5) construction site for the artificial recharge pond system of about 8 Rais (0.01 square kilometer). The site is located at Ban Nong Na, Moo 8, Nong Kula Sub-District, Bang Rakam District, Phitsanulok Province.

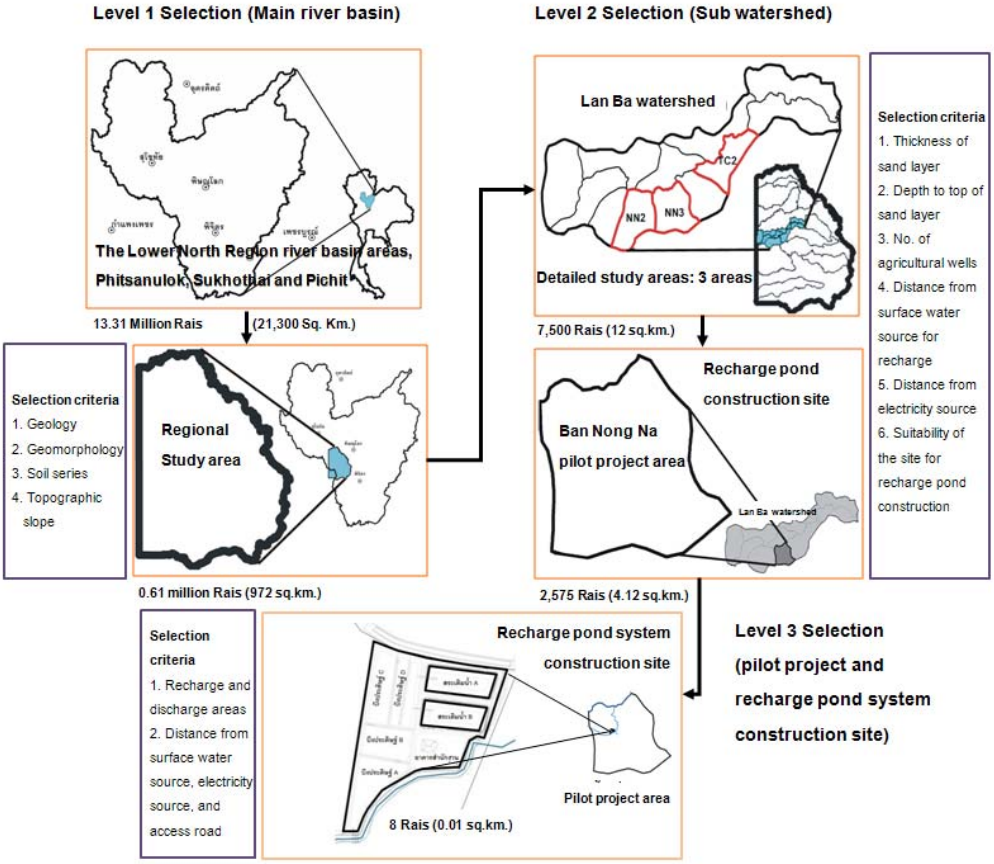


Figure 3-1 Steps for the selection of the study area

3.2 Hydrogeologic Conditions

The Lower North Region river basin area is situated in flood plains of the Yom and Nan Rivers (Figure 3-2). The area is bounded by Phrae and Uttaradit provinces to the north, Loei and Phetchabun provinces to the east, and Lampang and Tak, and Kamphaengphet provinces to the west. The topography expression is the flat lowland area with high mountain ranges bounded in the north, west, and east. The Yom and Nan rivers flow from north to south. The climate is the humid tropical with annual teperatures varied from 20 – 36 degree Celcius. The annual rainfall and evapotranspiration are 1,300 and 1,500 mm., respectively (Department of Meteorology, 2553).

3.2.1 The Lower North Region River Basin Area

The Lower North Region river basin is underlain by 2 hydrogeological units of unconsolidated and hard rock units (Figures 3-3 and 3-4) as in the following: (1) Unconsolidated hydrogeological unit is found in the central part of the area and consists of: (1.1) Recent Flood Plain Deposits (Qfd or Qcp) of sands and gravels alternated with clay layers. The aquifer thickness varies from 30 – 35 meters with aquifer yield of about 15 – 25 cubic meters per hour; (1.2) Low Terrace Deposits (Qlt or Qcr) of clays, silts alternated with gravelly sands forming the aquifer with thickness ranging from 10 - 60 meters and groundwater yield of 15 - 20 cubic meters per hour; (1.3) High Terrace deposits (Qht or Qcm) of gravels, sands, and rock fragments spreads in the flat hill-foot areas. The depth to aquifer varies from 80 – 100 meters from ground surface and the groundwater yield varies from 30 – 50 cubic meters per hour. (2) Hard rock hydrogeological Unit is located in the north and northeast parts of the area. Groundwater is stored in fractured aquifers which consist of: (2.1) Limestone aquifer with intercalated shales and sandstones in some areas. The groundwater yield of limestone aquifer is about 2 -5 cubic meters per hour. (2.2) Metamorphic and Igneous rock aquifers where fractures are continuous could provide groundwater yield of approximately 1 - 5 cubic meters per hour. Shallow groundwater flows mainly from the north to south and from the west and east rims to the center of the area. The groundwater usages for domestic, industrial and agricultural consumptions in the Lower North Region river basin are approximately 38, 7, and 7,900 million cubic meters, respectively.

3.2.2 Regional Study Area

The regional study area (Figures 3-5 and 3-6) is the flood plain located in the west side of the Yom River covering the areas of Bang Rakam District, Phitsanulok Province; and Wachira Baramee and Sam Ngam Districts, Pichit Province. The groundwater usages for

growing rice and sugar cane are about 1,624 and 180 cubic meters per Rai per year, respectively. The total amount of groundwater use is 734 million cubic meters per year. The results of groundwater balance study showed the groundwater deficit of 51 million cubic meters per year which is equivalent to the groundwater level decline of approximately 26 centimeters per year.

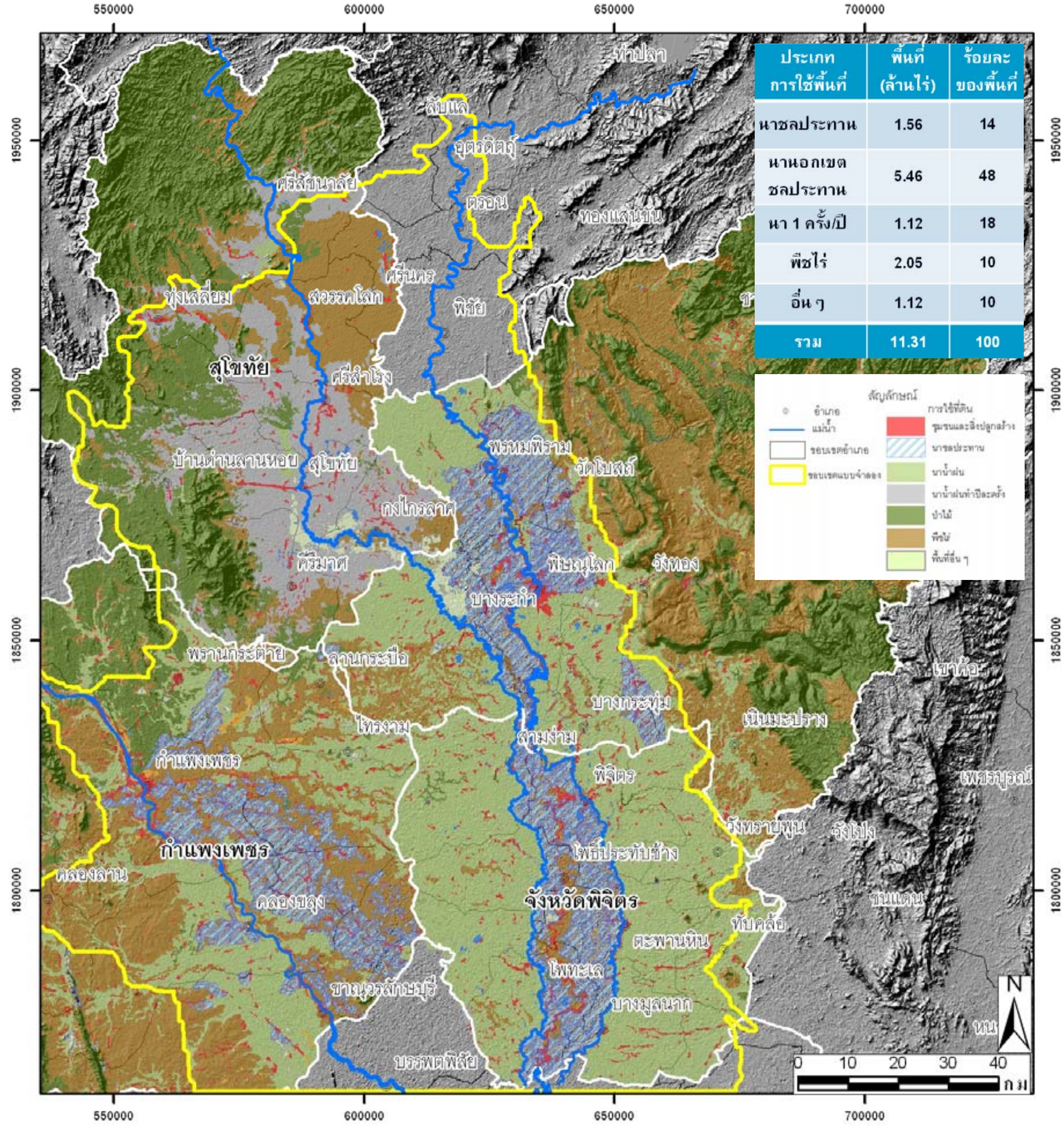


Figure 3-2 Topography and landuse conditions in the Lower North Region river basin

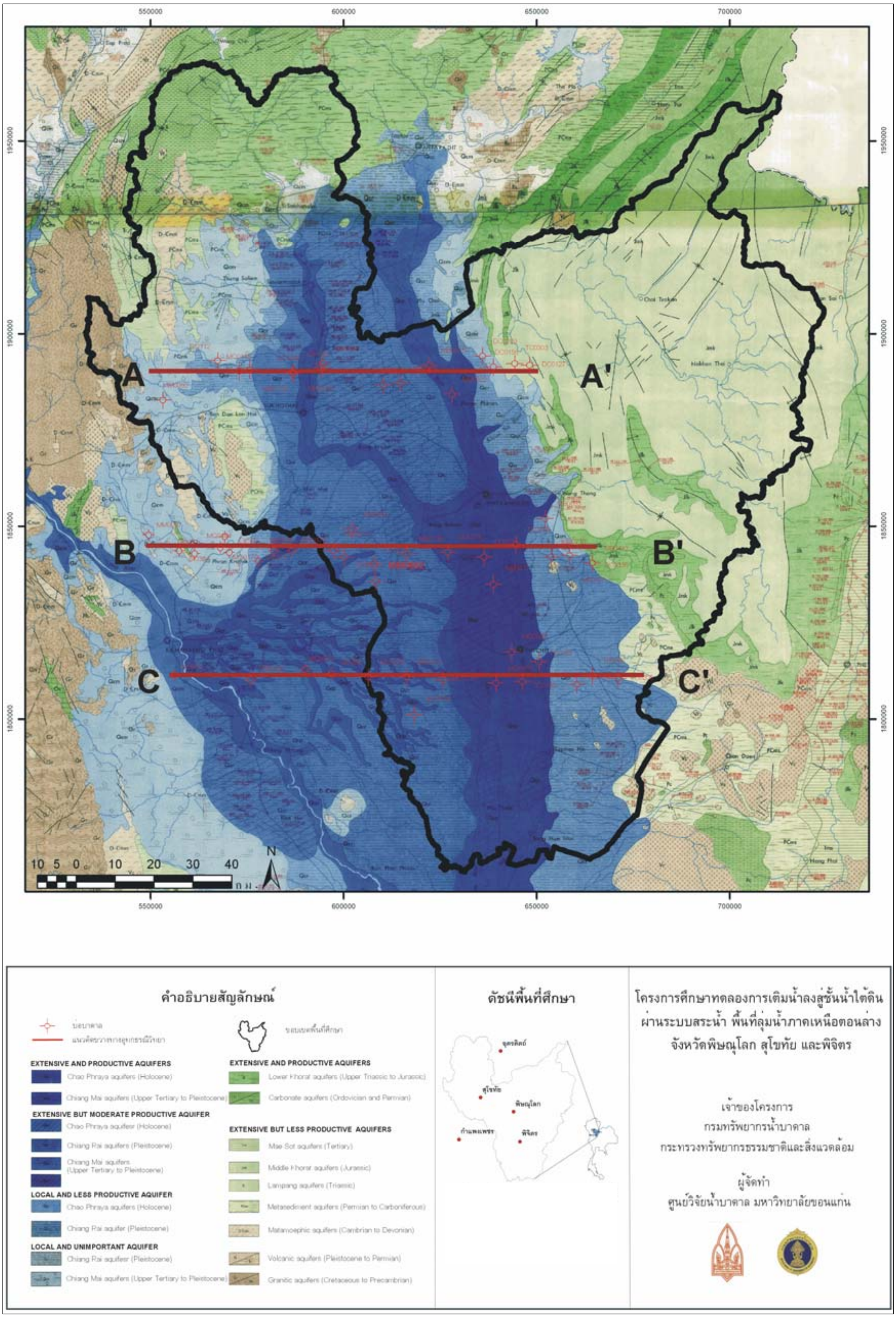


Figure 3-3 Hydrogeological map of the Lower North Region river basin area

(Modified after Department of Mineral Resources (DMR), 2526)

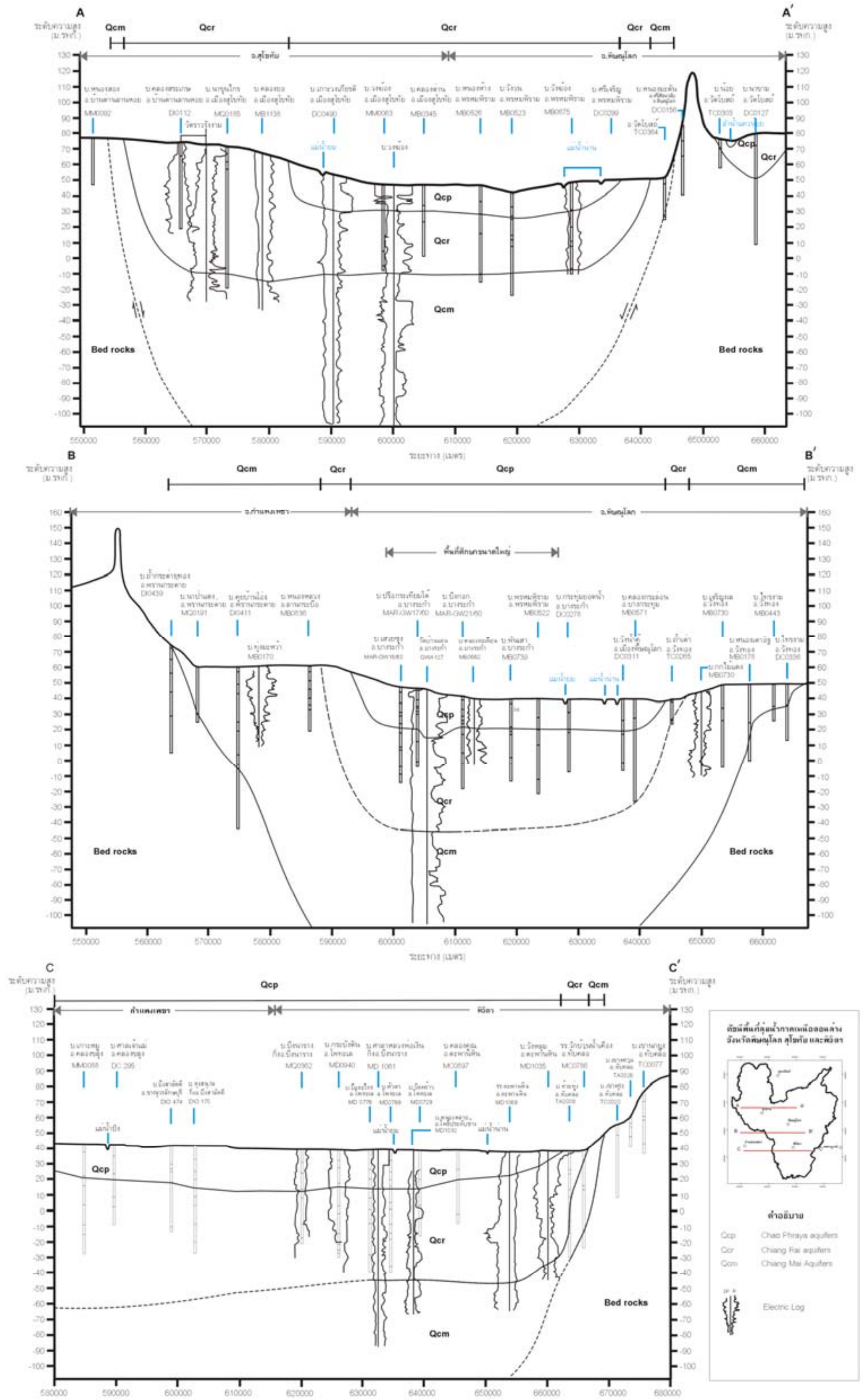


Figure 3-4 Hydrogeological cross sections of the Lower North Region river basin area (Modified after Department of Mineral Resources (DMR), 2526)

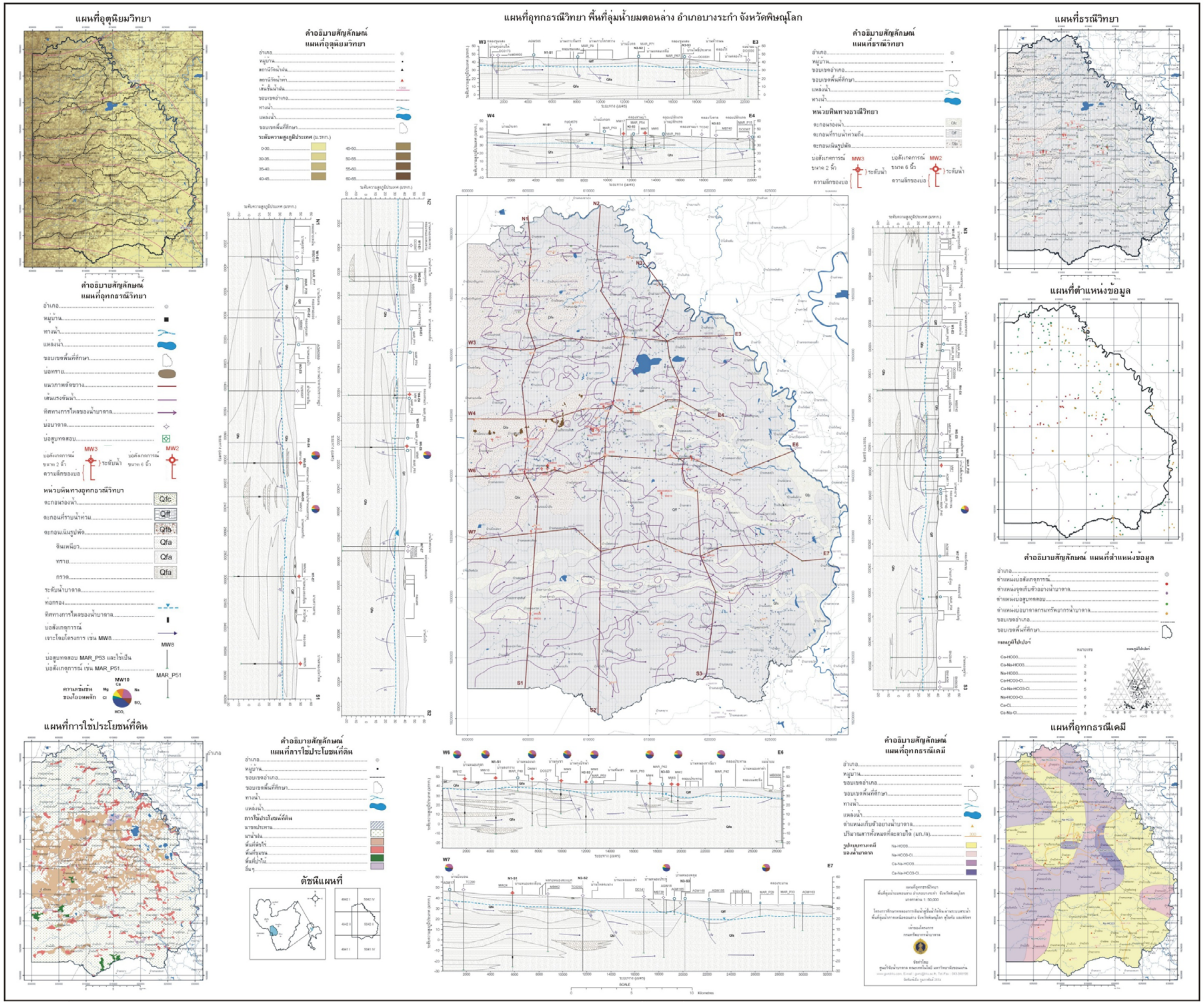


Figure 3-5 Hydrogeological map of the lower Yom River Basin area

3.2.3 Detailed Study Area

The detailed study area (Figure 3-7) is located in Klong Lan Ba watershed area which consists of the areas of Ban Nong Na 3 (NN3), Ban Thung Cha 2 (TC2), and Ban Nong Na 2 (NN2) covering the total area of 12 square kilometers. The area of Ban Nong Na 3 (NN3) was selected as the most suitable area considering many suitability indices such as the thickness of the top clay layer, shallow aquifer thickness, agricultural well densities, distance from surface water source, and availability of electricity.

3.2.4 Ban Nong Na Pilot Project Area

The surface water soures in Ban Nong Na pilot project area consist of (1) Lan Ba drainage canal located in the upper part of the area drains water from the west to east and (2) drainage canal in the center of the area receiving the drained water from paddy fields during the wet season and diverting groundwater for paddy field preparation in the dry season. This drainage canal provides raw water source for artificial recharge pond system.

The water flow in the drainage canal was calculated using rational method with input data from monthly rainfall intensity and coefficient of flow in relation to monthly rainfall in the Lower Yom River (Royal Irrigation Department, 2546). The calculation showed the annual water flow of 751,300 cubic meters and water flow during the wet season of 55,000 cubic meters. The evaluation of the surface water quality in this area found that water quality was good with no contamination from fertilizers, herbicides, or pesticides. The water turbidity varies from 6 – 460 NTU and manganese content varies from 4.9 – 8.4 mg/l. The chemical water type is Na-HCO_3.

There are about 100 shallow groundwater wells to pump the groundwater for growing rice and sugar cane in Ban Nong Na area. The groundwater usage during the dry season is about 1.26 million cubic meters (Table 3-1). Most farmers lower the well head (well sink) down to 4 – 6 meters from ground surface. The total of 47 groundwater observation wells was installed in the main directons of groundwater flow. These include 32 wells (30 wells of 6-inch diameter and 2 wells of 2- inch diameter) for shallow depths of less than 15 meters and 15 wells (1 well of 6-inch diameter and 14 wells of 2-inch diameter) for the depths greater than 15 meters. The hydrogeological investigation results show that the area is covered on top with clay layer of varying thickness of 0–4 meters (Figures 3-8 and 3-9).

The shallow aquifer consists of gravels, sands and silts with varying thickness of 10 – 15 meters and underlain by clay layer of 2 - 5 meters thick. The deep aquifer of coarse sands is located below clay stratum found at varying depths of 15 - 20 meters from ground surface. The aquifers are both heterogeneous and anisotropic. The analyses of pumping tests

data show that the shallow aquifer has the varying transmissivity (T) of 2,100-3,370 sq. m. per day (T_x=4,990 sq.m./day and T_y=6,250 sq.m./day), hydraulic conductivity of $2.43x10^{-3}$-$3.90x10^{-3}$ meter per second, and storage coefficient of 0.001-0.090. The deep aquifer has the transmissivity (T) of 30-150 sq.m. per day (T_x=-90 sq.m./day and T_y=-200 sq.m./day) and storage coefficient of 0.001-0.040. The groundwater in the area mainly flows from south to north with the natural recharge area located in the south or at Ban Nong Na. The recharge rate is estimated as 6-21 percent of the annual rainfall. The present groundwater level is 7-8 meters from the surface. The groundwater quality is in the standard for domestic consumption with high iron content of greater than 1.0 mg/l. The quality of groundwater for agriculture is excellent (sodium absorption ratio: SAR < 10). The chemical water type mainly is HCO_3 .

Table 3-1 Ratio of agricultural water usage in Ban Nong Na pilot project area

Water Uses	Wet season million cubic meters (%)			Dry season million cubic meters (%)		
	Rain and surface water	Groundwater	Total	Rain and surface water	Groundwater	Total
Rice	1.53 (90)	0.17 (10)	1.87 (100)	0.69 (40)	1.03 (60)	2.13 (100)
Sugar Cane	1.07 (100)	-	1.07 (100)	0.02 (10)	0.23 (90)	0.23 (100)
Total	2.60	0.17	2.94	0.71	1.26	2.36

3.2.5 Recharge Pond System Construction Area

The land for the construction site of the recharge pond system is leased by the project for 5 years period (October B.E. 2552 – October B.E. 2557) and is situated in the central part of the pilot project area immediately next to the drainage canal. The construction site consists of the areas for field office cabin, four (4) constructed wetlands, and two (2) recharge ponds (Figures 3-1 and 3-11 see Chapter 4 for details). The benefit receiving areas are the paddy fields located to the north and the paddy fields in the near surroundings.

The construction site is underlain by shallow aquifer of fine to coarse grained sands with the thickness of 12-15 meters interlayering with 1-5 meters clay stratum. The deep aquifer consists of medium to coarse grained sands and gravels alternated with clays. The groundwater flows from the southwest to the northeast with groundwater levels vary from 36-37 meters above mean sea level as shown in Figures 3-10 and 3-11.

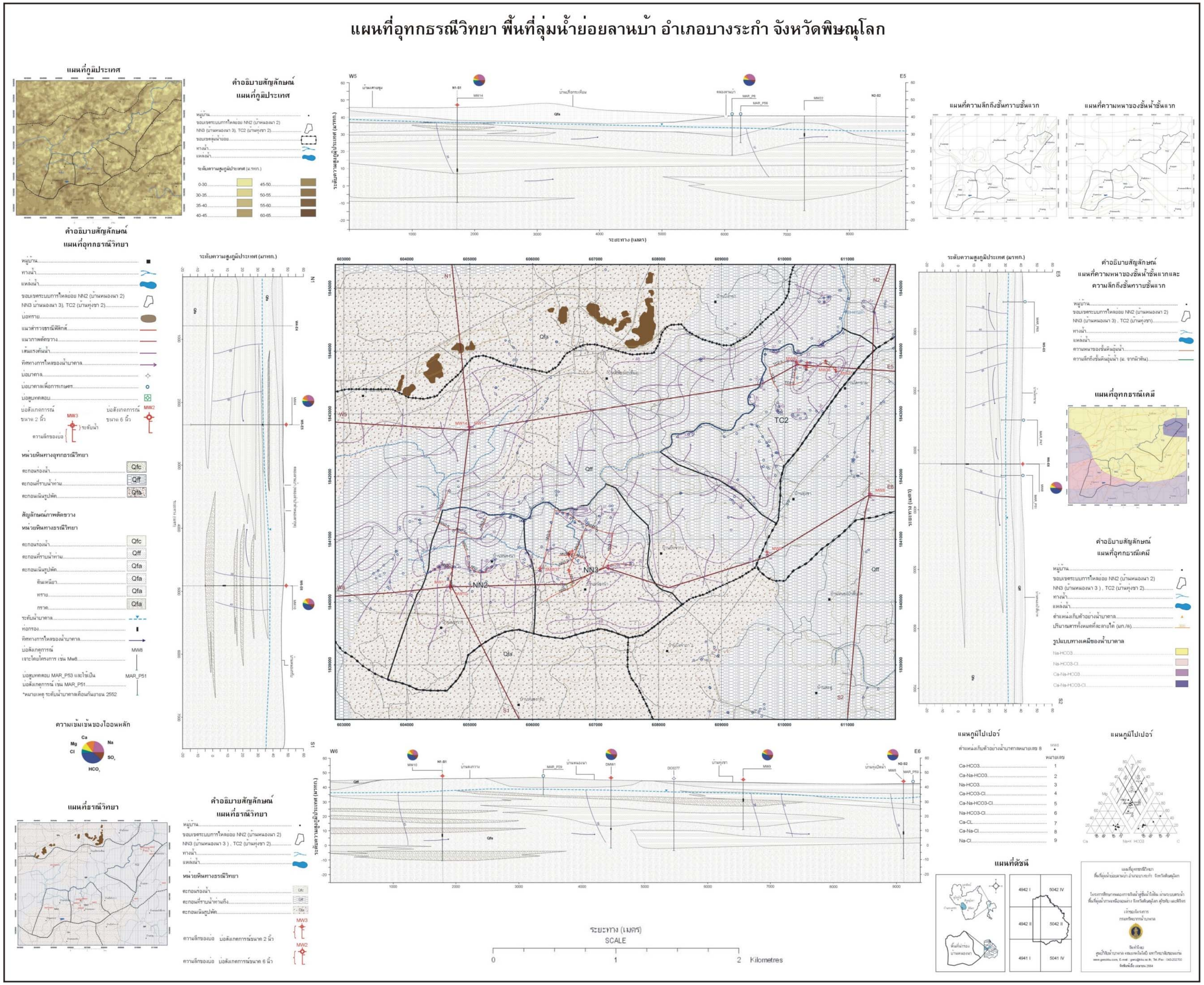


Figure 3-6 Hydrogeological map of the Lan Ba sub-watershed

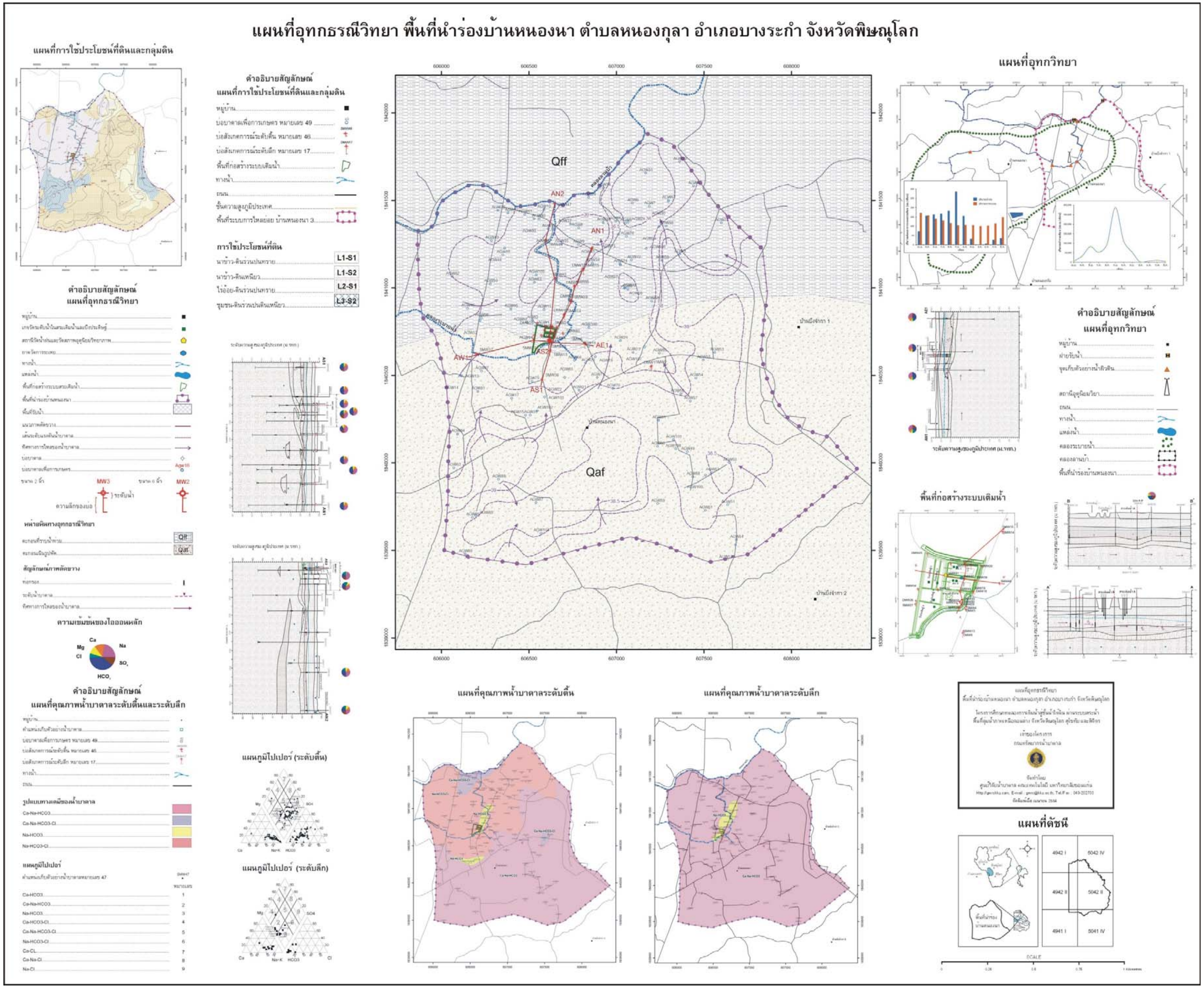


Figure 3-7 Hydrogeological map of Ban Nong Na pilot project area

3.3 Mathematical Groundwater Flow Modeling

3.3.1 Modeling Objectives

Visual MODFLOW 4.3 mathematical groundwater flow model was applied - in the Ban Nong Na pilot project and the regional study areas - to investigate the groundwater flows and natural groundwater recharge as well as to predict the impacts of the artificial recharge (Chapter 4) and apply the model to obtain the guidelines for mitigation of groundwater level decline (Chapter 5). The modeling simulations consist of (1) steady state simulation, (2) transient state simulation for 1 year period, and (3) prediction simulation of groundwater flow and groundwater balance for 10 years period. The conceptual models were established and models input data were derived from recharge rate from rainfall, surface water bodies, quantity of water used for agriculture, aquifer hydraulic parameters, and groundwater pressure or initial head as shown in Table 3-2.

Table 3-2 Model input data

Model Input Data	Ban Nong Na Area	Regional Study Area
Recharge rate from rainfall	6-21 % of annual rainfall	5-55 % of annual rainfall
Surface water bodies	Given: Lan Ba Drainage Canal uniform width of 20 m., river bed thickness of 1 m., water level and river bed level are derived from field data, hydraulic conductivity of 1.0x10-8 m./sec	Given: Yom River uniform width of 40 m., river bed thickness of 1 m., hydraulic conductivity of 1.0x10-8 m./sec
Groundwater uses for agriculture	Groundwater usage for rice growing: dry season at 1,520 cu.m./Rai, wet season at 104 cu.m./Rai, total groundwater usage of 1,624 cu.m./Rai/year, groundwater usage for sugar cane growing at 180 cu.m./Rai/year Groundwater wells for rice growing extracts 64 cu.m./day in the dry season and 5 cu.m./day in the wet season. Groundwater wells for sugar cane growing extracts 35 cu.m./day in the dry season.	Groundwater usage for rice growing: dry season at 1,520 cu.m./Rai, wet season at 104 cu.m./Rai, total groundwater usage of 1,624 cu.m./Rai/year, groundwater usage for sugar cane growing at 180 cu.m./Rai/year Groundwater wells for rice growing extracts 210 cu.m./day in the dry season and 17 cu.m./day in the wet season. Groundwater wells for sugar cane growing extracts 35 cu.m./day in the dry season
Aquifer hydraulic parameters	Horizontal hydraulic conductivity varies from 2.24×10^{-3} - 3.36×10^{-3} m./sec, storage coefficient varies from 0.001 - 0.090, ratio of vertical to horizontal hydraulic conductivity (Kv/Kh) is 1:10	Horizontal hydraulic conductivity varies from 1.10×10^{-4} – 4.25×10^{-3} m./sec, storage coefficient varies from 2.71×10^{-4} – 5.92×10^{-2}, ratio of vertical to horizontal hydraulic conductivity (Kv/Kh) is 1:10
Groundwater pressure or initial head	Data of December B.E. 2552 from 65 wells, Groundwater heads 35.5 – 40 m. above mean sea level	Data of September B.E. 2552 from 52 wells, groundwater heads 30 – 41 m. above mean sea level

3.3.2 Model Parameters Calibration

The hydraulic conductivity and storage coefficient were calibrated to obtain reliable parameters input values. The calibration was conducted by increasing or decreasing these parameters values until the calculated and observed water levels as well as groundwater flow patterns from the model and from the conceptual model were the same or similar.

The calibration results of the pilot project area show that the values of hydraulic conductivity of the shallow and deep aquifers are $9x10^{-5}$ and $2.5x10^{-4}$ meters per second, respectively. The calibrated storage coefficients of the shallow and deep aquifers are 0.22 and 0.12, respectively. The root mean squared residual, RMS, of the observed and simulated groundwater levels is 0.31 meter which is acceptable.

The calibration of the model parameters of the regional study area shows the hydraulic conductivity of shallow and deep aquifers of $1.8x10^{-4}$ and $2.0x10^{-4}$ meter per second, respectively. The storage coefficient of the shallow and deep aquifers is 0.20. The RMS of the observed and simulated groundwater levels is 0.893 meter which is acceptable.

3.3.3 Parameters Sensitivity Analysis

The sensitivity analysis of the model parameters is the analysis of the sensitivity of parameters values to model results these variables include the vertical and horizontal permeabilities, storage coefficient, and recharge rate. The values are assigned to 5, 10, 1/5, and 1/10 orders of magnitude of the calibrated values and the groundwater levels are simulated. The sensitivity analysis results show the maximum to minimum order of sensitivity as recharge rate, vertical hydraulic conductivity, storage coefficient, and horizontal hydraulic conductivity.

3.3.4 Modeling Results

The results of mathematical groundwater modeling show that - in the Ban Nong Na pilot project area – the main groundwater flow is from the upland area in the south to the north part. Groundwater over-extraction in the area generates the cone of depression in the north part of the area (Figure 3-8). The annual groundwater balance (B.E. 2553) shows the system influx and out flux of approximately 1.34 and 1.57 million cubic meters, respectively. The shallow groundwater extraction is approximately 1.40 million cubic meters and resulting in the groundwater system deficit of 0.23 million cubic meters and causing groundwater level decline at the rate of 25 centimeters per year.

The groundwater in the regional study area flows from the west upland part to the east. The groundwater cones of depressions are found in the central and the east portions of the area (Figure 3-9). The annual groundwater balance in B.E. 2553 showed the system influx

and outfluxes of 223 and 273 million cubic meters, respectively. The shallow groundwater extraction is approximately 272 million cubic meters and resulting in the groundwater system deficit of 51 million cubic meters and causing groundwater level decline at the rate of 26 centimeters per year.

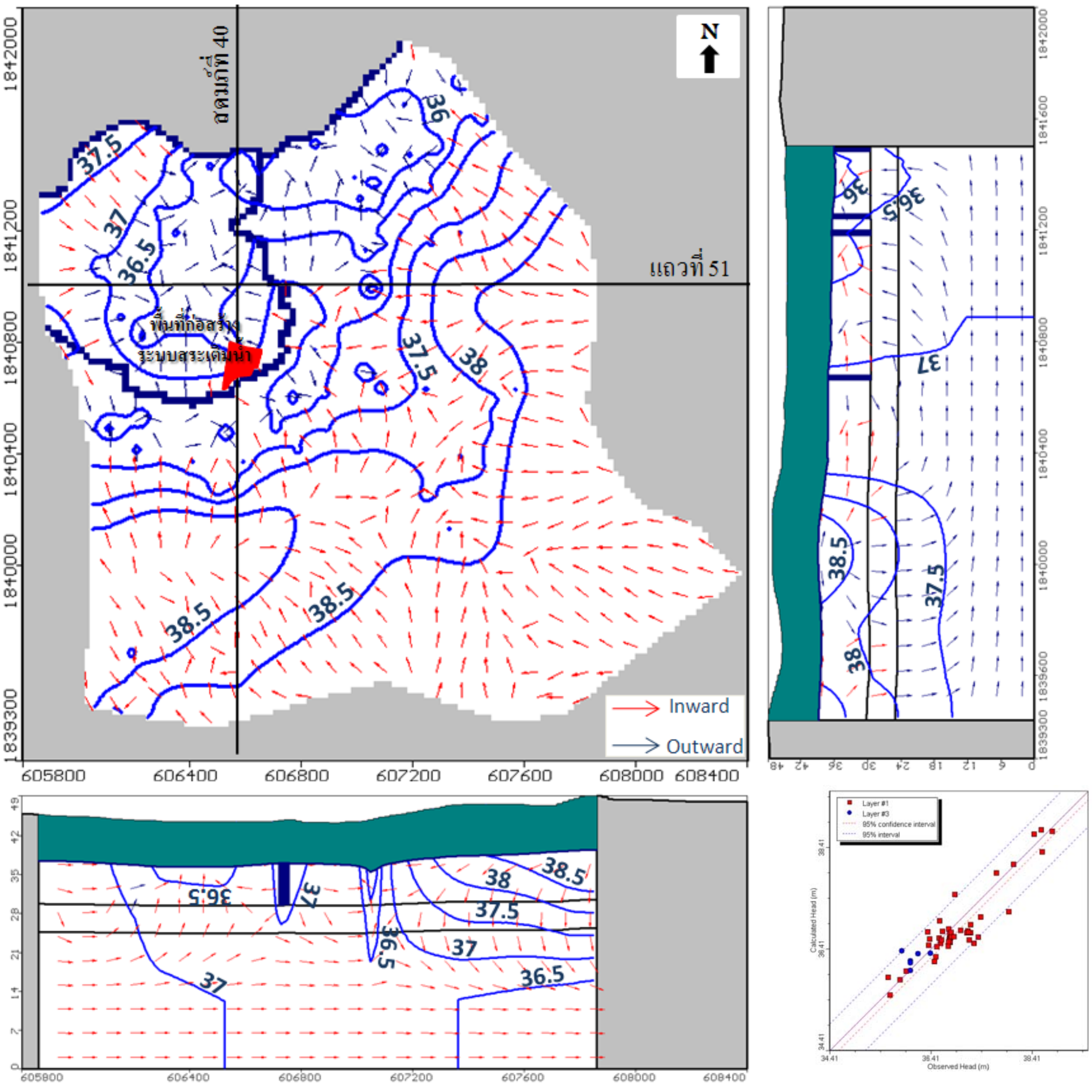


Figure 3-8 Results of groundwater flow simulation in Ban Nong Na pilot project area

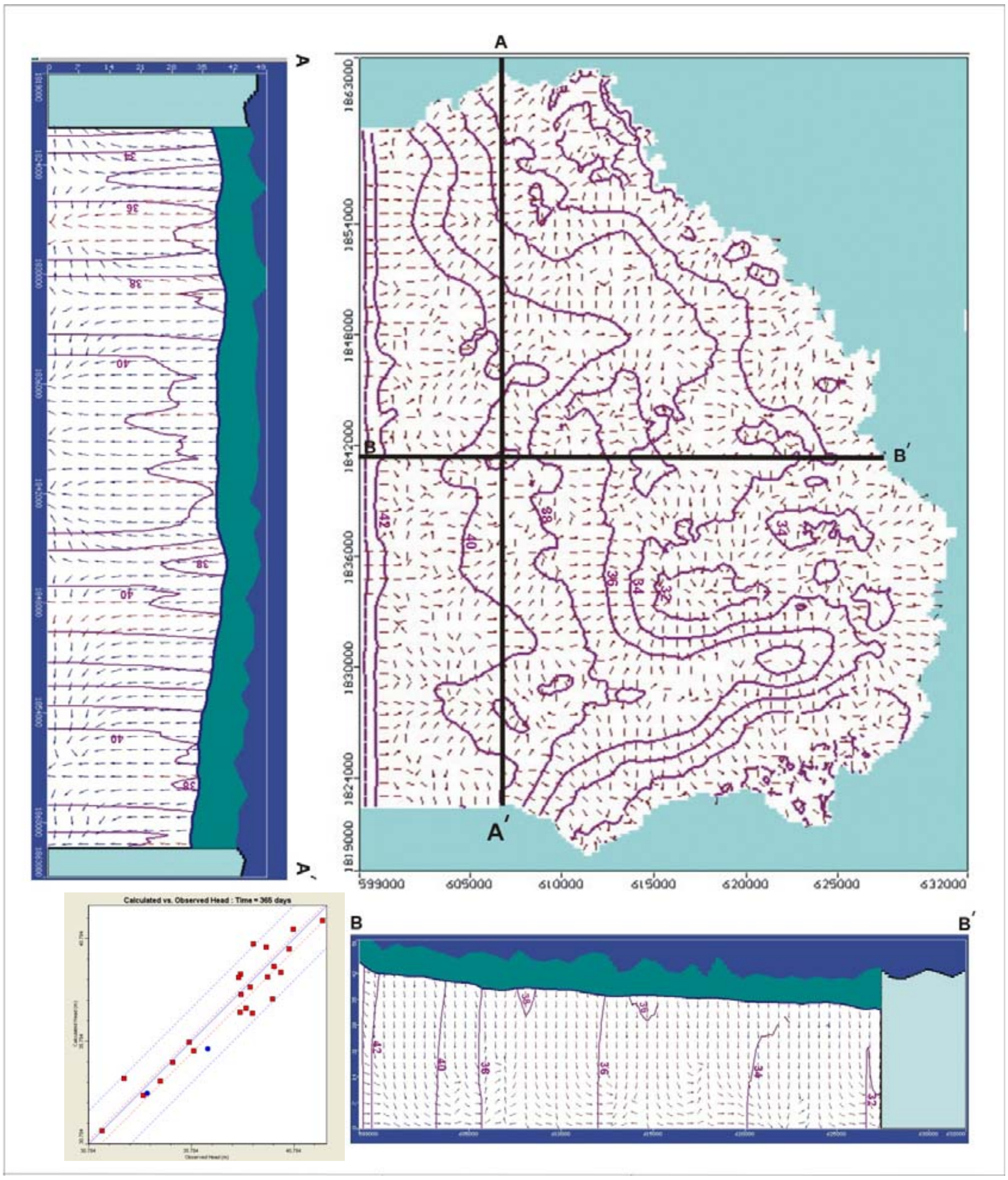


Figure 3-9 Results of groundwater flow simulation in the regional study area

3.4 Important Issues

The study area can be categorized into 5 areas, namely: 1) the Lower North Region river basin area which embraces the administrative areas of Phitsanulok, Sukhothai, Pichit, and some parts of Kamphaengphet Provinces; 2) Regional study area which covers the western part of the Yom River; 3) Detailed study area which occupies the Klong Lan Ba watershed area; 4) Ban Nong Na pilot project area; and 5) Recharge pond construction site which locates at Ban Nong Na, Nong Kula Sub-district, Bang Rakam District, Phitsanulok Province. General site conditions of each study area are illustrated in forms of maps and hydrogeological cross sections of shallow aquifers. For the Lower Yom River area and the Lan Ba Sub-watershed area, the hydrogeological maps at the scales of 1:50,000 and 1:10,000 are produced, respectively.

Ban Nong Na pilot project area was selected for the construction site of the recharge pond system. The selection criteria were established and selection procedure was based on Boolean method (Saraf, 2004). The area is suitable for the construction site of recharge pond system because it fits various suitability indices such as; (i) hydrogeological suitability which include thin top clay layer of less than 3 meters thick, thick shallow strata (10-15 meters) of sands and gravels with good continuity of strata; (ii) there are about 100 agricultural wells for target water user; (iii) suitable distance from raw surface water source; (iv) availability of electricity and access road; and (v) availability of land and good cooperation from local people and local organization.

The results of the present (B.E. 2543) groundwater balance study using mathematical groundwater model simulations in the Ban Nong Na pilot project and the regional study areas showed the groundwater deficit of 0.23 million cubic meters and 51 million cubic meters, and groundwater level decline of 25 and 26 centimeters, respectively. Within the next 20 years if there is no artificial recharge or no reduction in groundwater usage, the shallow aquifers may be permanently damaged.

Chapter 4
Experiment of Artificial Recharge and Preliminary Evaluation of Project Cost-Benefit

The design and experiment of artificial recharge consist of the design and construction of the artificial recharge system, experiment and treatment of raw water quality for recharge, recharge experiment operation (small and large scale), monitoring the impacts of groundwater level and groundwater quality, operation and maintenance of the recharge pond system, and preliminary evaluation of project cost-benefit.

4.1 Design and Construction of Recharge System

4.1.1 Design of Recharge System

The concept for designing the recharge system includes (i) the system must be simple and easy to operate, and (ii) use appropriate technology which could be extended for implementation in the future. The recharge system design components consist of raw water diversion system, raw water quality treatment system, recharge pond, site office, recharge monitoring system, and recharge evaluation system.

4.1.2 Construction of Recharge System

The components of the recharge system include raw water diversion system, raw water quality treatment system, site office and monitoring system, and recharge rate measuring system. The construction work duration of the recharge system is 60 days.

1) Raw water diversion system consists of concrete weir with water controling gate capable of raising maximum water level to 1.5 meters. The water inlet to the system is installed with rectangular concrete culvert capable of regulating the in flux rate by gravity of 1-200 cubic meters per hour,

2) Raw water quality treatment consist of 4 constructed wetlands, namely, Wetlands A, B, C, and D (Figure 4-1) with the areas of 1.237, 975, 992, and 813 square meters, respectively. The floor of each constructed wetland has the consecutive differential levels of 0.3 meter and capable of storing water level up to 0.60 meter. The local tolerant and fast growing plants such as canna and triangular papyrus were planted in the constructed wetlands. The embankments of the constructed wetlands were lined with geotextile and covered with vetiver grass to protect embankment erosion.

Figure 4-1 Componnents of recharge system

3) The recharge ponds A and B (Figure 4-1) have the ground surface areas of 1,250 and 1,160 square meters and the bottom floor areas of 660 and 600 square meters, respectively. The depths of the ponds A and B are 2.66 and 2.75 meters with the maximum storage capacity - at the storage level of 2 meters – of 1,830 and 1,690 cubic meters, respectively. The side slope of the ponds were designed at 1.5 : 1 to ensure slope stability. The bottom floor of the ponds were covered with filter sand layer of 0.5 meter thick and the side walls and bottom floors were lined with synthetic filtering blankets for sediments filtering and protection of erosion.

4) The field office cabin and control system consist of office room, meeting room, electricity control system, and the toilet.

5) Climate monitoring system consists of automatic rainfall measuring device and class A evaporation pan for evaporation measurement.

6) Surface water level measuring system consists of water quantity measuring tool using sharp edge regtangular concrete weir installed at 6 locations and water level measuring staff gauges installed at 7 locations.

7) Groundwater level and groundwater quality monitoring system composes of observation wells system with 47 observation wells installed at the depths greater and less than 15 meters in the near vicinity of the recharge ponds. The recharge evaluation system consists of recharge evaluation and assessment of constructed wetland performance and system maintenance.

4.2 Experiment of Raw Water Treatment System

The constructed wetland is used to treate the water turbidity using various treatment conditions such as different rates of water flow through the wetland, type and density of plant, and initial turbidity of water at the inlet. Eighteen (18) experiments were carried out during the wet season in B.E. 2553 and the results showed that:

1) Case I: Three (3) types of plant, namely, canna, rice and triangular papyrus were planted in the constructed wetlands. Water flow - through rate was controlled at about 30 cubic meters per hour and the initial turbidity of water from the drainage canal varied from 40 - 119 NTU. The experiment showed that the constructed wetland with triangular papyrus had the highest efficiency in turbidity reduction.

2) Case II: Given 4 different water flow rates of 0.5, 9.5, 15.6, and 93.1 cubic meters per hour, the flow rate of 9.5 cubic meters per hour showed the highest efficiency in turbidity reduction.

3) Case III: The constructed wetland planted with the triangular pyparus and using water flow rate of 9.5 cubic meters per hour could reduce 67 % initial turbidity.

4.3 Recharge Experiment

4.3.1 Filtration Experiment in Laboratory and Small Scale Recharge Pond

The objective of this experiment is to determine the parameter values and obtain the suitable raw water quality for the design of the recharge pond system. The experiments consist of laboratory tests and on site small scale filtration pond experiment. The laboratory filtration experiment using low (0.5 NTU) and high (100 NTU) turbity water with experiment duration of 100 hours showed the final readings of filtration rates of 3.27 meters per day and 0.15 meter per day, respectively. The on site small scale filtration pond experiment using intermediate (51.2 NTU) turbidity water with experiment duration of 30 hours showed the final reading of filtration rate of 2.53 meters per day. The experiment showed no indication of clogging.

4.3.2 Recharge Pond Experiment

The objective of the experiment is to investigate the rate of recharge and pond clogging considering the cases of using and not using synthetic filter sheets at the bottom of the pond and the cases of different turbidities of raw water for recharge. The experiment results are as in the followings:

1) The recharge rates vary from 0.05 to 2.05 meters per day (60 - 2,460 cubic meters per day per sq. meter) using water with the turbidities vary from 12 to 287 NTU (average turbidity of 76 NTU). The total recharged water is 25,797 cubic meters.

2) Using and not using synthetic filter sheets at the bottom of the pond shows very small difference in infiltration rate of 0.04 meter per day.

3) Infiltration characteristics could be categorized into 4 stages, namely; stage 1: the infiltration rate increases (day 1 - 4) from 0.14 to 0.79 meter per day; stage 2: the infiltration rate rapidly decreases (day 5 - 8) from 0.78 to 0.28 meter per day; stage 3: the infiltration rate decreases (day 9 - 15) from 0.27 to 0.16 meter per day; and stage 4: the infiltration rate gradually decreases (day 16 - 30) from 0.15 to 0.07 meter per day. The last stage (stage 4) of the infiltration readings indicate the approach of the clogging of the pond bottom.

4) The assessment of the artificial recharge in the wet season (duration of 4 months) showed that effective artificial recharge could be achieved using recharge water with tubidities of 70, 100, and 140 NTU and frequencies of annual recharge pond cleaning of 1, 2,

and 4 times, respectively. The maximum recharge quantity of 36,000 cubic meters per year could be achieved using recharge water with tubidity of 70 NTU and frequency of annual recharge pond cleaning of 4 times.

5) The guidelines for future similar projects development include: 1) artificial recharge using constructed wetland and recharge pond system; 2) artificial recharge using sedimentation pond and recharge pond system; and 3) artificial recharge using recharge pond only.

4.4 Monitoring of Groundwater Level and Groundwater Quality Impacts

The groundwater level underneath the recharge ponds rises to the highest level of 3.33 meters from normal immediately after 5 days of artificial recharge operation and after that gradually lowers to normal level. The groundwater flows from the recharge pond area to the surrounding region and the north with average flow velocity of 0.07 meter per day. The results of the physical, chemical and biochemical groundwater quality monitoring show no indications of groundwater quality changes.

4.5 Operation and Maintenance of Recharge Pond System

The operation and maintenance of recharge pond system consist of the management of raw water quality treatment system, recharge operation, data management, and maintenance of recharge pond system.

1) The management of effective raw water quality (turbidity) treatment system includes the control of water flow-through rate in the constructed wetlands to the rate of not greater than 10 cubic meters per hour and control of water turbidity at the inlet not greater than 150 NTU.

2) The management of recharge system is separated into 2 parts, namely, the monitoring measurement for recharge decision making and that for the recharge impact study as follow:

(2.1) Daily monitoring measurement of raw water turbidity and related parameters both in the drainage canal and in the exit constructed wetland. For recharge operation decision, raw water turbidity should be less than 50 NTU with the allowable maximum limit of 100 NTU. The raw water for recharge with turbidity greater than 100 NTU should not be used.

(2.2) Data collection for recharge impact study should be carried out both during the recharge and no recharge operation which include the measurement of the climate conditions, measurement of surface water level, measurement of water quality and quantity, measurement of groundwater level, measurement of groundwater quality, and measurement

of groundwater uses. These data will be stored in the database system for easy data search and retrieval for recharge analysis as well as for effectice recharge reporting.

3) Maintenance of recharge pond system consists of raw water quality treatment system, recharge pond system, climate monitoring system, and office cabin. The maintenant activities include the monitoring inpections of operation conditions according to the provided checklists and maintenant regulations and procedures.

4.6 Preliminary Evaluation of Project Cost-Benefit

The preliminary evaluation of the project cost-benefit is conducted using the Benefit-Cost Ratio (B/C Ratio) method. The benefits of the project are calculated from direct benefits derived from recharged groundwater usages (approx. 85 % of recharged water) and incomes from rice growing of about 4,600 Baht per Rai per year. The project costs are calculated from the construction costs (recharge ponds and diversion structures) and maintenance costs (recharge pond cleaning and maintenance) considering the discount rate of 5 % and project life of 10 years. The benefit-cost analysis results of the three suggested types of artificial recharge pond systems – which include 1) constructed wetland and recharge pond, 2) sedimentation pond and recharge pond, and 3) recharge pond only - are summarized and illustrated in Table 4-1 and Figure 4-2.

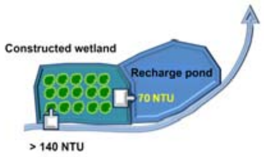
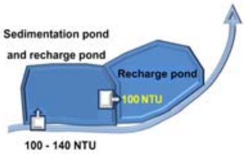
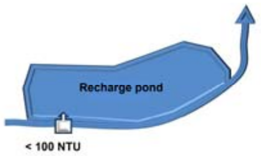
4.7 Important Issues

The experiment on artificial recharge and preliminary evaluation of project cost-benefit consist of the design and construction of recharge system, evaluation of the raw water quality treatment system performance, recharge pond operation test, the monitoring of groundwater level and groundwater quality impacts. The important issues are summarized as in the followings:

1) The design and construction of the artificial recharge system consist of such recharge components as raw water gravity diversion system, constructed wetland system for raw water quality treatment, recharge pond, site office and control system, maintenance system and recharge monitoring system.

2) Eighteen experiments on raw water quality treatment system during the wet season (July- October, B.E. 2553) showed that the suitable constructed wetland for raw water quality treatment was the one with triangular pyparus and controlled surface water flow-through rate of 9.5 cubic meters per hour. The system could reduce water turbidity of 67 percent of the initial inlet water turbidity.

Table 4-1 Suitability of various recharge pond systems

Type 1: Constructed wetland and recharge 	Suitable for raw water source with turbidity greater than 140 NTU, high B/C ratio where the recharge system area greater than 10 Rais and achieve the investment cost within 3 years (Figure 4-2)
Type 2: Sedimentation pond and recharge pond 	Suitable for raw water source with turbidity of 101 - 140 NTU, high B/C ratio where the recharge system area greater than 10 Rais and achieve the investment cost within 3 years (Figure 4-2)
Type 3: Recharge pond only 	Suitable for raw water source with turbidity of not greater than 100 NTU, high B/C ratio where the recharge system area greater than 10 Rais and achieve the investment cost within 4 years (Figure 4-2)

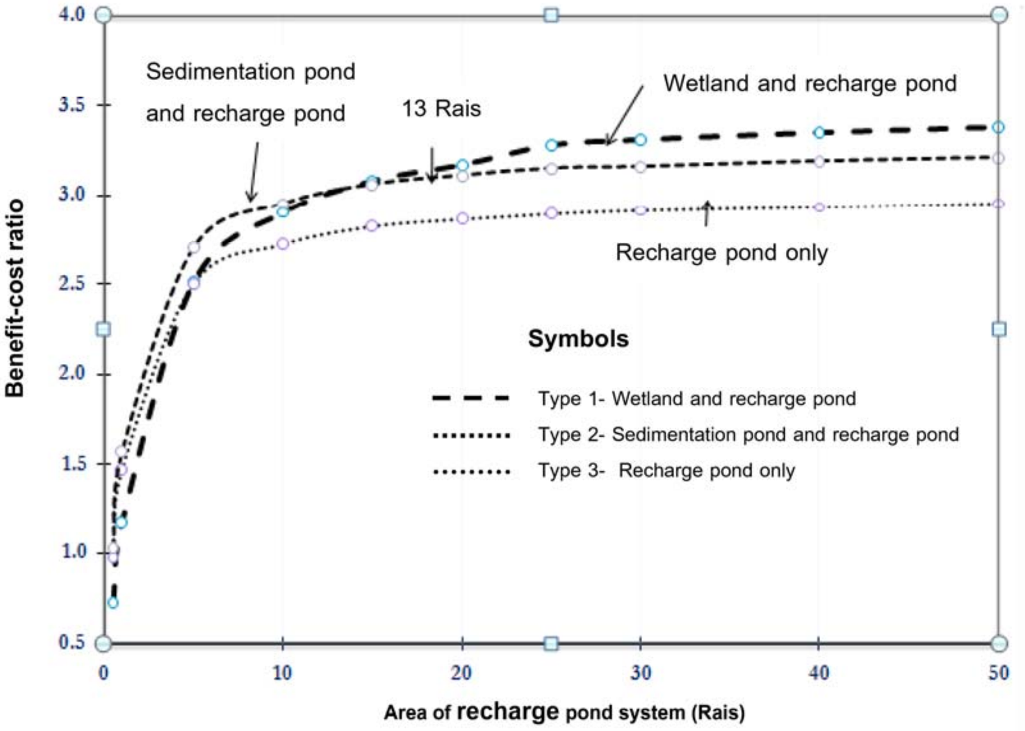


Figure 4-2 Relationship between the area of recharge pond system and benefit-cost ratio

3) The results of the recharge operation show that:

(3.1) The recharge rate varies from 0.05 – 2.05 meters per day (60 – 2,460 cubic meters per day per sq. meter) and the total recharged water is 25,797 cubic meters.

(3.2) The use and not use of synthetic filter at the recharge pond bottom shows very small difference in infiltration rate.

(3.3) The Infiltration characteristics could be categorized into 4 stages, namely; day 1 – 4, day 5 – 8, day 9 – 15, and day 16 – 30 with the infiltration rates of 0.14 - 0.79, 0.78 - 0.28, 0.27 - 0.16, and 0.15 - 0.07 meter per day, respectively. The infiltration rate of less than 0.15 meter per day indicated the recharge pond clogging.

(3.4) The assessment of the artificial recharge in the wet season (duration of 4 months) showed that effective artificial recharge could be achieved using recharge water with tubidities of 70, 100, and 140 NTU and frequencies of annual recharge pond cleaning of 1, 2, and 4 times, respectively. The maximum recharge water quantity of 36,000 cubic meters per year could be achieved using recharge water with tubidity of 70 NTU and frequency of annual recharge pond cleaning of 4 times.

(3.5) The guidelines for future similar projects development include: 1) artificial recharge using constructed wetland and recharge pond system with raw water turbidity of greater than 140 NTU; 2) artificial recharge using sedimentation pond and recharge pond system with raw water turbidity of 101-140 NTU; and 3) artificial recharge using recharge pond only with raw water turbidity of less than 100 NTU.

4) The groundwater level underneath the recharge ponds rises to the highest level of 3.33 meters from normal. The groundwater flows from the recharge pond area to the surrounding region and the north with average flow velocity of 0.07 meter per day. The results of the physical, chemical and biochemical groundwater quality monitoring show no indications of groundwater quality changes.

5) The results of economic feasibility study of the pilot recharge system by the benefit-cost method shows that - if the project is extended to other areas- the recharge system should have the area of at least 10 Rais in order to achieve the investment cost within 3 years time.

Chapter 5
Guidelines for Groundwater Recharge Master Plans Formulation and Mitigation of Groundwater Level Decline Problem

The objective of this chapter is to provide guidelines and suggest the systematic groundwater recharge master plan formulation by using the compiled groundwater recharge principles and methods together with other considerations of existing case studies such as Master Plan for Artificial Recharge to Groundwater in India (Central Ground Water Board, 2002), Artificial Recharge Strategy.- A national approach to implement artificial recharge as part of water resource planning, South Africa (Murray et al., 2007), technical data obtained from the experiment in the groundwater recharge using recharge pond system, hydrogeological information of the area, results of the mathematical groundwater modeling of the area, results of the environmental studies, and other related issues.

5.1 Master Plan Formulation Guidelines

5.1.1 Components

Groundwater recharge master plan formulation should be developed considering information from various sources incorporating the participatory planning process involving local organizations, authorities, and government and private stakeholders. The master plan structure has the following important components:

1) The Goal: Identification of long-term goal
2) The Themes: Areas that need to be addressed in order to realize the goal
3) The Management Objectives: The objective of each theme
4) The Situation Assessments: The current status in relation to the Management Objectives
5) The Strategic Approach: Key focus areas that need to be addressed in order to reach the Management Objectives
6) Actions: The tasks required to fulfill the strategic Approach
7) Responsibility: The organization responsible for implementing the Actions
8) Priority: The order of implementing the Actions

5.1.2 The Goal of the Master Plan

The goal of the groundwater recharge master plan should include institutional processes, academic development, Conservation awareness, and community participatory management of groundwater resources. The plans should be classified into three (3) phases,

namely, short-term, intermediate-term, and long-term. The Department of Groundwater Resources (DGR) should identify the duration of each phase from the results of present situation assessment, and potential capacity of the organization and personnel.

5.1.3 Strategic Issues of the Groundwater Recharge Plan

The strategic issues of the groundwater recharge plan should include various themes as in the followings:

1) Knowledge theme: - To create awareness and provide education on artificial recharge to local people,

2) Legislation and regulation theme: - To enable water management and water services institutions to adopt and regulate artificial recharge as part of integrated water resources management (IWRM),

3) Planning theme: - To facilitate the use of artificial recharge in achieving sustainable, efficient and cost effective water resource use and management,

4) Implementation theme: - To support water management and water services institutions in implementing artificial recharge,

5) Management theme: - To optimize the management of artificial recharge schemes,

6) Research theme: - To develop a body of knowledge that support efficient and effective implementation and operation of artificial recharge schemes, and

7) Strategy implementation theme: - To implement and update the artificial recharge strategy.

5.1.4 Strategy and Preliminary Action Plan

The strategic issues consist of strategic approach, action plan and priority of various works as described in details in the main report and summarized as in the followings:

1) Knowledge theme

Broaden awareness and educate local people on artificial recharge via public relation, artificial recharge networking, and assign the authority to be the liaison for the artificial recharge in the Lower North Region. Educate students, government officials and practicing professionals on the values, practicability, feasibility, implementation and operation of artificial recharge schemes. Disseminate the information on the groundwater recharge pilot project to demonstrate the value and operation of the groundwater recharge scheme and serve as an educational center, as well as establish local authority for project extension to other areas according to priority.

2) Legislation and regulation theme

Establish regulations to facilitate the artificial recharge and create an organization to carry out and maintain the artificial recharge as a part of the integrated water resources management (IWRM). The important issue is that artificial groundwater recharge is not yet mentioned or existed in the Groundwater Legislation. The DGR should: i) clarify the current legal requirements for authorizing artificial groundwater recharge projects; ii) clarify the authorization process and provide guidance and training on this; and ii) review the current legislation and establish whether amendments or new regulations are needed.

3) Planning theme

The DGR should prompt data compilation and investigations to produce the master plans for artificial groundwater recharge in the Lower North Region area so as to facilitate the use of artificial recharge in achieving sustainable, efficient and cost effective water resource use and management.

Planning for artificial recharge needs to be accommodated at national, regional, and local levels. The following areas should be targeted:

(3.1) Artificial recharge needs to target two spheres within the water sector. These include the water resource management sphere and the water services sphere,

(3.2) The artificial recharge potential per water management area and sub-areas needs to be quantified,

(3.3) Localized areas where artificial recharge is needed should be identified. This should include areas where water tables have dropped due to high groundwater abstraction, where suitable source water is available, and where aquifer hydraulics and water quality characteristics are favorable for artificial recharge,

(3.4) Identify specific planning areas and purposes where artificial recharge could have significant impact. For example, areas where artificial recharge could augment groundwater reserve; and areas where artificial recharge could assist in mitigating the effect of drought hazard and climate change, and

(3.5) Identify the areas where artificial recharge development is suitable and cost effective.

4) Implementation theme

The DGR should support water management and water services institutions in implementing artificial recharge. The approach to supporting the successful implementation of artificial recharge schemes include:

(4.1) Develop groundwater level monitoring system,

(4.2) Provide guidance on the technical aspects of artificial recharge system construction,

(4.3) Create an incentive mechanism for local government authorities to adopt artificial recharge. The aim should be to encourage the wise use of existing water resources and infrastructure before developing more costly new sources,

(4.4) Develop support mechanisms for implementing artificial recharge schemes, and

(4.5) Develop training courses on implementing artificial recharge schemes.

5) Management theme

Artificial groundwater recharge schemes in the Lower North Region river basin areas are not yet officially and systematically implemented. At present, the implementation begins with different individual pilot projects initiatives. The successful artificial recharge schemes must have financial management, planning, control, and personnel development. Important activities in artificial recharge include efficient management, raw water diversion to the recharge area, raw water treatment, construction of recharge system, prevention and management of clogging, evaluation and monitoring of the aquifer response, suitable groundwater recovery, and the management of the quality of recovered water.

The approach to enhance capacity to manage artificial recharge schemes needs to focus on three key areas, namely;

(5.1) Provide guidance and support mechanisms for effectively operating artificial recharge schemes. This needs to include identifying the skills required to operate schemes, a mechanism for assessing the performance of schemes, and a system to support data capture and management,

(5.2) Develop a training course on the operation and maintenance of artificial recharge schemes, and

(5.3) Produce standards pertaining to the design, construction, operation, and maintenance of artificial recharge schemes.

6) Research theme

Encourage and support detailed research and development to find suitable and efficient methods of artificial recharge as well as develop a body of knowledge that supports efficient and effective long-term implementation and operation of artificial recharge schemes in the Lower North Region areas. Recently, there are four (4) different pilot research projects related to artificial recharge, these are: (i) recharge using rainwater harvesting from roof run-off, (ii) recharge using recharge pond, (iii) recharge using groundwater well, and (iv)

recharge using deep well injection. The research projects carried out by the DGR should categorize into two (2) groups, namely, detailed researches and practical pilot researches for short-term project implementation. Research approach to support the development of artificial recharge should include:

(6.1) Research which is geared towards developing principles or guidelines for artificial recharge techniques,

(6.2) Research pertaining to water quality issues and environmental impact such as hydrogeochemical risks and clogging in iron-rich aquifers as well as the issues related to the use of treated raw water as a source for artificial recharge,

(6.3) Research related to socio-economic issues of artificial recharge.

7) Strategy implementation theme

To implement the plan, detailed master plan and implementation preparedness of the area should be made. The key success factors of artificial recharge project consists of the demand of the artificial recharge, raw water source, aquifer hydraulics, water quality, methods of artificial recharge, environmental issues, legislation issues, socio-economic issues, management issues, and preparedness of the involving organization. Artificial recharge must have the institution and authorizing organization to look after in project implementation and in project extension in the local agencies using participatory feasibility considerations from various aspects of engineering, socio-economy and environment. Artificial recharge project permission process should separate into 4 phases, namely, prefeasibility study, feasibility study, construction, and operation and maintenance.

5.2 Guidelines for the Mitigation of Groundwater Level Decline Problem

5.2.1 Guidelines for the Mitigation of Groundwater Level Decline Problem in Ban Nong Na Area and in the Regional Area

The study of groundwater balance in the Ban Nong Na pilot area and in the regional study area found the annual groundwater deficit of 0.23 and 51 million cubic meters, respectively. This causes groundwater level decline at the rate of 25 and 26 cm. per year, respectively. If groundwater pumping is continued at the current rate and no artificial recharge is performed, the groundwater shortage crisis may exist in the near future. Mathematical groundwater modeling of the area was conducted and various model parameters of hydrologic and hydrogeologic systems were calibrated. The model was then applied to investigate the groundwater recharge using recharge pond as well as simulate to obtain guidelines for future artificial recharge management. Model simulation scenarios in this study include: (i) groundwater recharge to achieve the balance of groundwater system, and (ii) groundwater

recharge to raise 2 meters of groundwater level within 10 years period by using the initial model parameters as follow:

1) Quantity of recharge water to achieve the groundwater system balance,

2) Quantity of recharge water to raise 2 meters of groundwater level is calculated from: study area (square meter) x specific yield (Sy) x 2 m/year x 10 years (Sy is the average specific storage coefficient of the aquifer),

3) Average recharge rate at 0.2 m/day (obtain from the experiment result),

4) Recharge duration of 120 days (July – October, wet season),

5) Areas of the recharge pond in the Ban Nong Na pilot project and that of the regional study area: 1 recharge pond has the area of 1,600 square meters (1 Rai) and the regional study area has the recharge area of 40,000 square meters (25 Rais),

6) Numbers of recharge ponds are obtained from: required water quantity (cubic meter/year)/recharge rate(cubic meter/year),

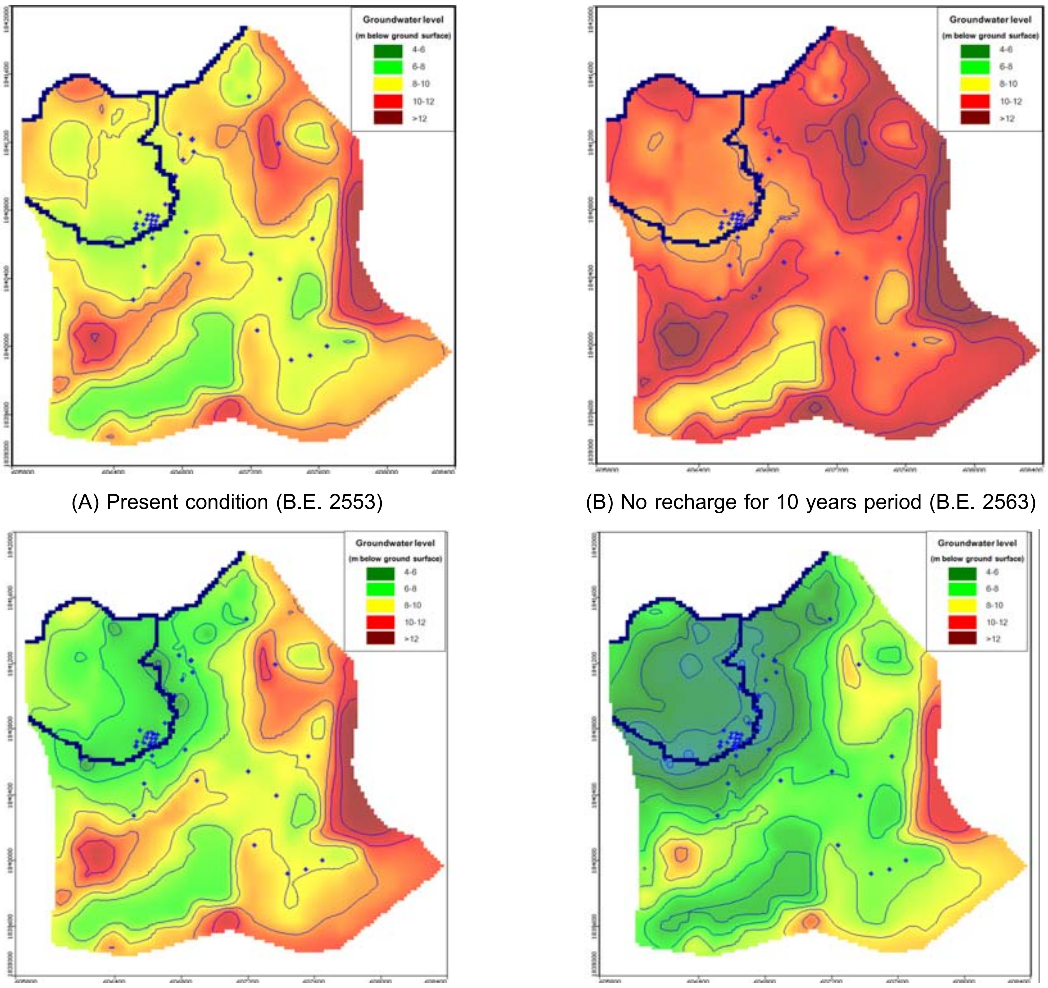
7) Recharge potential areas include areas with suitable hydrogeologic conditions, close to surface water source, available access road, and close to the impact target area that required groundwater level raising.

The results of the model simulation showed that using the recharge pond area of 1 Rai could provide recovery water for rice growing of 16 Rais. To achieve the groundwater system balance in Ban Nong Na pilot project area, the amount of 0.20 million cubic meters of recharged water is required and 6 Rais of recharge pond areas is needed.

In case of increasing groundwater level at the rate of 2 meters per year for 10 years period with the same pumping rate, the amount of 1.81 million cubic meters of recharged water is required and 11 Rais of recharge pond area is needed. At present (B.E. 2553), the critical zone with groundwater level deeper than 8 meters from ground surface covers the area of approximately 500 Rais (0.8 square kilometer). In the next 10 years (B.E. 2563), with the same pumping rate, the critical zone would increase to 2,194 Rais (3.51 square kilometers). If groundwater recharge to achieve groundwater balance and to raise 2 meters per year of groundwater level for 10 years period were performed, the groundwater level critical zone would decrease to 856 Rais (1.37 square kilometer) and 475 Rais (0.76 square kilometer), respectively.

The simulation of groundwater recharge in the regional study area showed that the amount of 51.18 million cubic meters of recharged water and recharge pond areas of 1.400 Rais are required. To raise 2 meters per year of groundwater level- for 10 years period with the same pumping rate- the amount of 927 million cubic meters of recharged water is required and 2,450 Rais of recharge pond area is needed. The results of the mathematical

groundwater model simulations are illustrated in Figures 5-1 and 5-2. The simulation results showed that, at present (B.E. 2553), the critical areas- where groundwater levels are deeper than 8 meters below ground surface- cover the areas of 347,500 Rais ((566 square kilometers). In the next 10 years (B.E. 2563), with the same present pumping rate, the critical zone would expand to 510,000 Rais (816 square kilometers). If groundwater recharge to achieve groundwater balance and to raise 2 meters per year of groundwater level for 10 years period were performed, the groundwater level in the critical zone would decrease to 275,625 Rais (441 square kilometers) and 151,250 Rais (242 square kilometers), respectively.



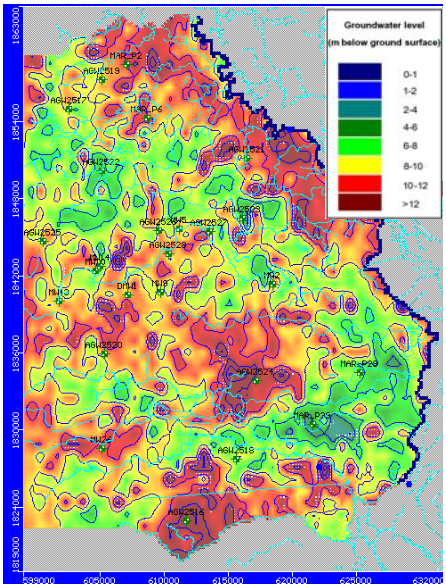
(A) Present condition (B.E. 2553)

(B) No recharge for 10 years period (B.E. 2563)

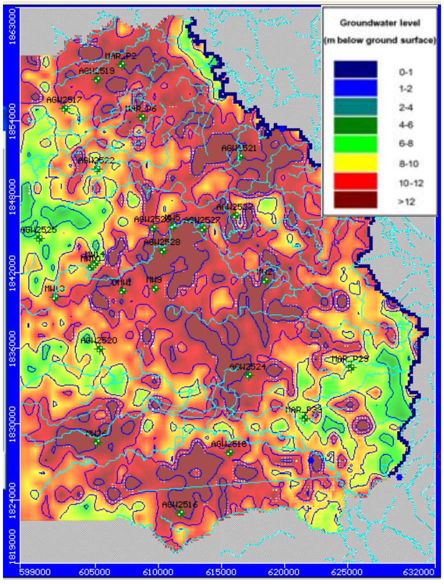
(C) Recharge to achieve groundwater system balance (B.E> 2553-2563)

(D) Recharge to raise 2 meters per year of groundwater level for 10 years period (B.E. 2553-2563)

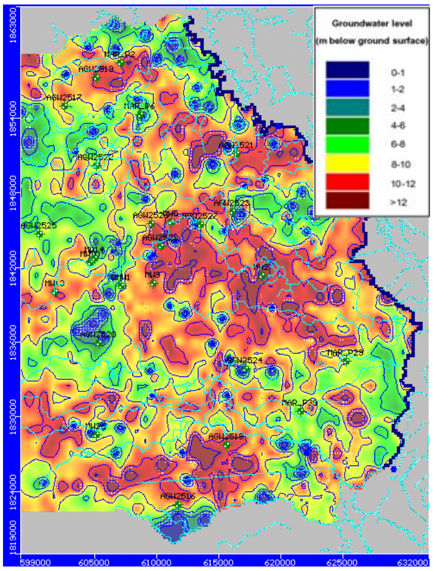
Figure 5-1 Maps of groundwater level depths in the Ban Nong Na pilot project area



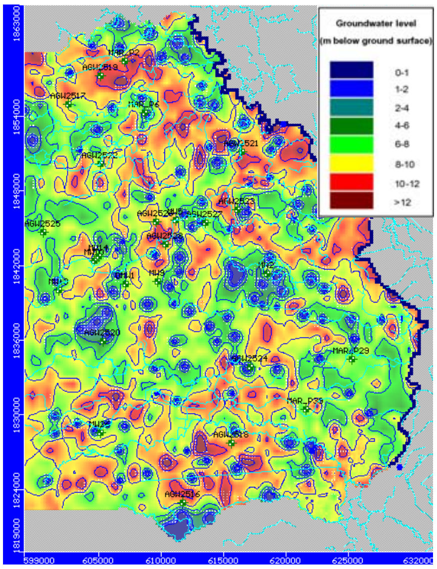
(A) Present condition (B.E. 2553)



(B) No recharge for 10 years (B.E. 2563)



(C) Recharge to achieve groundwater system balance (B.E> 2553-2563)



(D) Recharge to raise 2 meters per year of groundwater level for 10 years period (B.E. 2553-2563)

Figure 5-2 Maps of groundwater level depths in the regional study area

5.2.2 Guidelines for the Mitigation of Groundwater Level Decline Problem in the Lower North Region River Basin Area

The results of this study show that natural groundwater recharge in the Lower North Region river basin area is approximately 6,980 million cubic meters per year. The recharge to and discharge from rivers are approximately 415 and 179 million cubic meters per year, respectively. Approximately 7,785 million cubic meters per year of groundwater were used for agriculture. This causes groundwater deficit of about 569 million cubic meters per

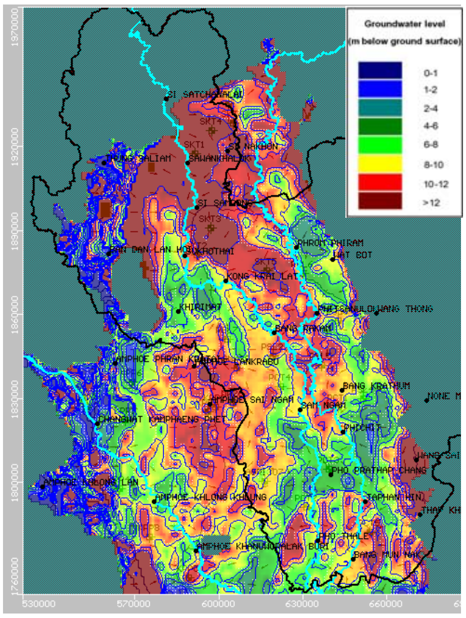
year which is equivalent to groundwater level decline of about 15 centimeters per year. The guidelines for the mitigation of groundwater level decline problem in the area (Figure 5-3) are as in the followings:

1) Artificial recharge to achieve groundwater balance using recharge pond areas of about 8,075 Rais and that of old sand pits areas of about 2,550 Rais together with deep well groundwater recharge method could produce recharged water of about 569 million cubic meters per year. The benefit receiving areas cover approximately 146,700 Rais. The investment cost for 20 years artificial recharge system development by the government is approximately 4,392 million Bahts. Farmers obtain the incomes from rice growing about 10,036 million Bahts.

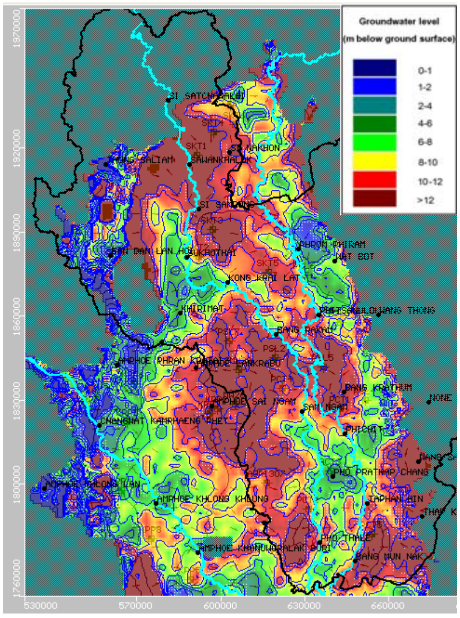
2) Artificial recharge in the critical areas - to raise 2 meters of groundwater level- using recharge pond areas of 16,388 Rais and old sand pits areas of 2,550 Rais together with deep well groundwater recharge method could recharge water into aquifers the amount of 1,044 million cubic meters per year. The benefit receiving areas cover about 365,000 Rais. The investment cost for artificial recharge system development by the government is approximately 7,027 million Bahts. Farmers obtain the incomes from rice growing about 33,580 million Bahts. The study results showed that 20 Sub-districts of drought hazard areas (Table 5-1) and 133 Sub-districts of flood hazard areas (Table 5-2) could be mitigated.

The groundwater critical areas in the Lower North Region river basin could be categorized into 3 levels, namely; (i) very high critical areas where groundwater levels are deeper than 12 meters and covering the areas of 26 Sub-districts (Table 5-); (ii) high critical areas where groundwater levels ranging from 10 – 12 meters deep, covering the areas of 47 Sub-districts (Table 5-4); and (iii) intermediate critical areas where groundwater levels varying from 8 – 10 meters, covering the areas of 73 Sub-districts (Table 5-5). At present, the total groundwater critical areas in the Lower North Region river basin are 6.56 million Rais (10,500 square kilometers). In the next 10 years, with no groundwater recharge, the groundwater critical areas would increase to 6.66 million Rais (10,656 square kilometers). If artificial recharge to raise 2 meters of groundwater level is carried out the critical areas would decrease to 6.30 million Rais (10,080 square kilometers).

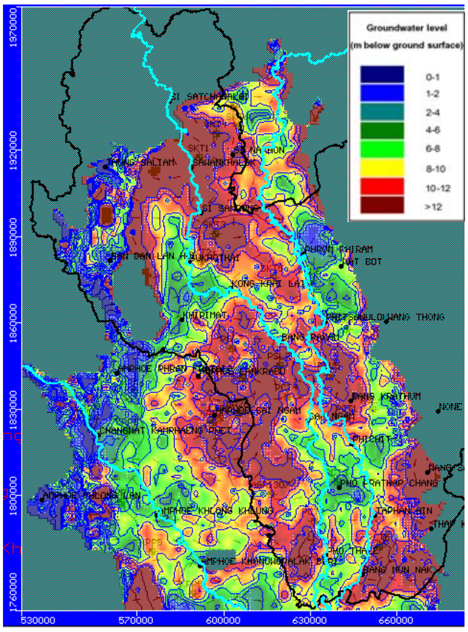
The suitable artificial recharge methods for the Lower North Region river basin areas include recharge using rain water harvesting from roof run-off, recharge pond , recharge reservoirs and weirs, dry well recharge, and deep well injection recharge. The selection of suitable artificial recharge methods must consider the major factors in hydrogeology (Figure 5-4 and Table 5-6).



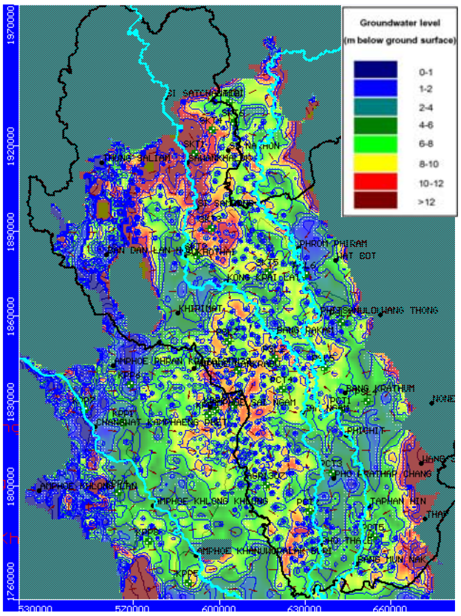
(A) Present condition (B.E. 2553)



(B) No recharge for 10 years (B.E. 2563)



(C) Recharge to achieve groundwater system balance (B.E> 2553-2563)



(D) Recharge to raise 2 meters per year of groundwater level for 10 years period (B.E. 2553-2563)

Figure 5-3 Maps of groundwater level depths in the Lower North Region river basin area

Table 5-1 Drought hazard districts that require recharge to raise 2 meters per year of groundwater level

Province	District	Sub-District
Sukhothai	Srisaschanalai	Nong Or/ Thachai
	Sawankalok	Yanyao/Naimuang/Klong krajong/Klong Yao
	Thung Saliam	Thung Saliam
	Srisamrong	Na Khun Krai
	Muang	Ban Kluay
Pitsanulok	Bang Rakam	Kui Muong/Bang Rakam
	Muang	Samokhae
Pichit	Wachirabaramee	Ban Na/Nong Lub/Bueng Bua
	Phothale	Bang Lai/ Thai Nam/ Thanong
	Muang	Pa Makab
	Pho Prathabchang	Dong Ser Lerng

Table 5-2 Districts receiving flood hazard mitigation from groundwater recharge

Province	District	Sub-District
Sukhothai	Srisassanalai	Sarachit/Nong Or
	Sawankalok	Yan Yao/Pa Kumko/Wang phinphat/Na Thung/Wang Maikhon/Muang Bang Klang/Nong Klub/Tha Thong
	Srinakorn	Nakorndert/Namkhum/Srinakorn
	Srisamrong	Ban San/Rao Tonchan/ Wat Ko/Ban Rai/Ban Na/Wang Luk/Wang Thong/Ko Taliang/Wang Yai/Thabphueng
	Muang	Ban Kluay/Wang Thong Daeng/Tantia/Ban Suan/Pakkwae/Banlum/Yangsai/Pak Phra
	Kirimas	Ban Pom/Thung Luang/Tanod/Samphuang/Nong Krading/Nong Jig
	Kong Krailas	Krainai/Kraiklang/Kok Rad/Krai Nok/Pa Phaek/Ban Mai Sukkasem/Dong Duay/Ban Krang/Kong/Tha Chanuan/Nong Tum
Pitsanulok	Phrom Phiram	Taluk Thaim/Sri Phirom/Nong Khaem/Wang Won/Phrom Phiram/Tha Chang/Ma Tum
	Ban Ra Kam	Kuy Muong/Bang Ra Kam/Chum Saeng Song Kram/Tha Nang Ngam/Bung Kok/Plak Rad/Phan Sao/Bo Thong
	Muang	Samo Khae/Makham Sung/Phai Kho Don/Chom Thong/Hua Ro/Pak Thok/Ban Krang/Phlai Chum Phon/Aranyik/Ban Klong/Tha Thong/Tha Pho/Bung Phra/Wat Phrik/Wang Nam Ku
Pichit	Wachirabaramee	Ban Na/Nong Lub/Wang Mok
	Pho Thale	Bang Lai/Thai Nam/ Thanong

Table 5-2 Districts receiving flood hazard mitigation from groundwater recharge (con'd)

Province	District	Sub-District
Pichit	Muang	Pa Ma Kab/ Yan Yao/Tha Lo/Phai Kwang/Klong Kachian/Pak Thang/Nai Muang/Tha Luang/Rong khao/Ban Bung/Muang Kao/Kamang/Dong Klang/Hua Dong/Dong Pakam
	Pho Prathabchang	Dong Sua Lueng/Wang Jik/Phairob/Pho Prathabchang/Nern Sawang/Phai Thapho
	Sam Ngam	Sam Ngam/Kamphaeng Din/Rang Nok/Nern Por
	Bung Narang	Bung Narang/Bang Lai
	Pho Thale	Wat Khang/Thai Nam/Pho Thale/Thung Noi/Tha Nong/Tha Bua/Ban Noi/Tha Khamin/Bang Klan/Tha Sao/Tha Nang
	Taphan Hin	Ngew Rai/Huay Ket/Wang Wa/Thab Man/Klong Kun/Sai Rongkhon/Dong Takhob
	Bang Mun Nak	Ho Krai/Nern Makok

Table 5-3 Artificial recharge methods in the very high critical areas.

Province	District	Sub-District	Recharge Methods
Sukhothai	Sawankalok	Nai Muang/Wang Khon Mai/Na Thung/Pa Kum/Ko/Yan Yao/Klong Krajong/Muang Bang Khlang/Nog Klab/Klong Yang/Pak Nam	Deep well injection
	Muang	Ban Suan/Tal Tia	Recharge Pond/Roof run-off harvesting
	KongKrailas	Krai Nai	
	Srisamrong	Ban Ko Ta Liang/Wang Luk/Ban Na/Watko Na khun Krai	
	Sri Nakorn	Had Siew/Tha Chai/Nakorn Dert	Deep well injection/recharge pond/ Roof run-off harvesting
	Wang Sai Phun	Nong Phra	recharge pond/ Roof run-off harvesting/recharge weirs
Pichit	Thab Klo	Khao Sai	recharge pond/ Roof run-off harvesting
Phitsanulok	Bang Rakam	Nong Kula	recharge pond/ Roof run-off harvesting/recharge weirs/Dry wells
	Muang	Ngew Rai	recharge pond/ Roof run-off harvesting/ Dry wells
Kamphaengphet	Khanu Woralaksaburi	Wang Chaphlu	recharge pond/ Roof run-off harvesting/recharge weirs
	Sai Ngam	Nong Maetaeng	

Table 5-4 Artificial recharge methods in the high critical areas.

Province	District	Sub-District	Recharge Methods
Sukhothai	Sawankalok	Pak Nam	Weep well injection
	Srisamrong	Ban San/Wang Thong/Rao Tonchan	Recharge pond/recharge weirs
	Srinakorn	Klong Maphlab/Srinakorn/Nakorn Dert	Weep well injection
	Muang	Tal Tia/Ban Suan	Recharge pond/recharge weirs/Roof run-off harvesting
	Kong Krailas	Krai Klang/Kok Rad/Dong Duay/Krai Nok	
Pichit	Pho Thale	Tha Khamin/Thanong	Recharge pond/Recharge weirs/Roof run-off harvesting/Dry wells
	Taphan Hin	Dong Takhob	
	Bang Mun Nak	Lam Pada/Phum	
	King Dong Charoen	Samnak Khun Nen/Huay Phuk	
Phitsanulok	Phrom Phiram	Sri Phirom/Wang Kong/Wangwon/Phrom Phiram/Thachang/Matum	Recharge pond/Recharge weirs/Roof run-off harvesting/Dry wells
	Muang	Phai Khondon/Ban Krang/Thathong/Tha Pho/Bung Phra/Wat Phrik	
	Bang Rakam	Nikom Phattana/Nong Kula	
	Bang Krathum	Tha Tal/Ban Rai	
Kamphaengphet	Lan Krabu	Bung Thab Rad/Nong Luang/Lan Krabu/Chong Lom/Pracha Suksan	Recharge pond/Recharge weirs/Roof run-off harvesting
	Sai Ngam	Sai Ngam/Nong Maikong/Nong Klam/Nong Maetaeng/Phan Thong	
	Sai Thong wattana	Thung Thong	

Table 5-5 Artificial recharge methods in the intermediate critical areas.

Province	District	Sub-District	Recharge Methods
Sukhothai	Muang	Wang Thong Daeng/Ban Kluay/Yang Sai	Recharge pond/Recharge weirs/Roof run-off harvesting
	Kong Krairas	Krai Nok/Paphaekkong	
	Srisamrong	Rao Tonchan/Wang Yai/Ban Rai	
Pichit	Wachirabaramee	Nong Lub/Wang Mok/Bung Bua/Ban Na	Recharge pond/Recharge weirs/Roof run-off harvesting/Dry wells
	Sam Ngam	Kamphaeng Din/Sam Ngam/Nern Por/Nong Sano	
	Muang	Yan Yao/Klong Kachian	
	Pho Prathabchang	Nern Sawang/Thung Yai/Phai Thapho/Dong Suer Lerng	
	Bung Narang	Bung Narang/Laem Rang/Bang Lai	
	Taphan Hin	Thab Man	
	Bang Mun Nak	Wang Taku/Nern Makok/Wang Samrong	
	Dong Charoen	Samnak Khunnen/Hua Phuk/Huay Ruam	
Phitsanulok	Bang Rakam	Chumsaeng Songkram/Kuy Muong/Tha Na Ngam/Nikom Phattana/Bang Rakam/Bung Kok/Nong Kula/Pluk Rad/Wang E-thok/Phan Sao/Bo Thong	Recharge pond/Recharge weirs/Roof run-off harvesting/Dry wells
	Muang	Wang Nam Ku/Ngew Ngam	
	Phrom Phiram	Taluk Thiam/Sri Phirom/Wangwon	
	Wang Thong	Wang Thong Daeng/Wang Phikun/Tha Muen Ram/Phan Chalee	
	Wat Bot	Tha Ngam	
	Bang Krathum	Tha Tal/Nakorn Pa Mak/Bang Krathum	
Kamphaengphet	Khanu Woralaksaburi	Bung Samakkee/Wang Cha On/Rahan/Yang Sung/Kong Phai/Ko Tal/Saen Tor	Recharge pond/Recharge weirs/Roof run-off harvesting/Dry wells
	Sai Ngam		
	Phran Kratai	Klong Phi Krai/Khaokiris	
	Muang	Nikom Thung Pho Thale	
	Sai Thong Wattana	Thung Thong	
	Lan Krabue	Bung Thab Rad/Nong Luang	

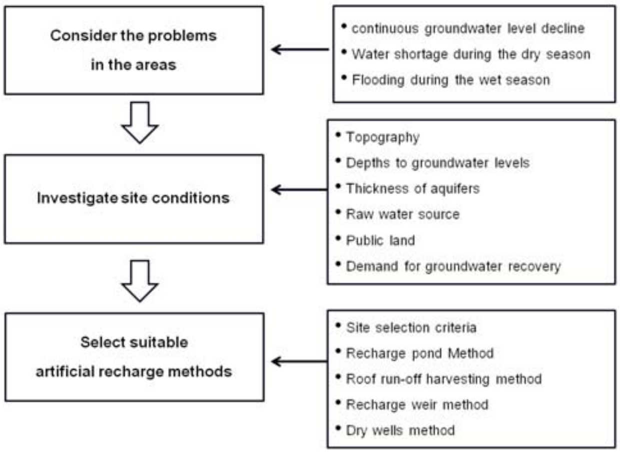
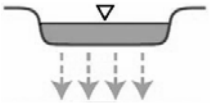
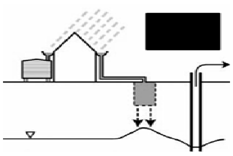
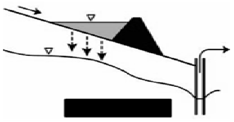
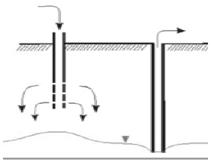
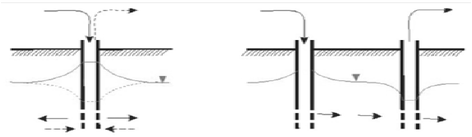


Figure 5-4 Procedure for selection of suitable artificial recharge methods

Table 5-6 Factors for selection of artificial recharge methods

Artificial recharge methods [1]	Selection factors
1. Recharge pond 	- Groundwater level decline - Depth to sand layer (thickness of overlying clay layer) - Thickness of the aquifer - Distance from surface water source
2. Rain water (roof run-off) harvesting 	- Groundwater level decline - Thickness of the aquifer - Location of village or community - Rain water collector
3. Recharge weir 	- Topographic slope - Stream profile - Groundwater level decline - Type of sediments in the weir
4. Dry well 	- Groundwater level decline - Distance from surface water source - Thickness of the aquifer
5. Deep well injection 	- Deep groundwater level decline - Distance from surface water source - Thickness of the aquifer

Remark: [1] Suitable artificial recharge methods for the Lower North Region river basin areas (modified after Dillon, 2006)

5.3 Integrated Development Plans for Artificial Recharge System

To achieve the successful development of artificial recharge system, integrated development plans for artificial recharge should be established (Figure 4-1 and Table 5-7). The Department of Groundwater Resources should cooperate with related government agencies such as Local Government Organizations, Royal Irrigation Department, Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, Department of Highways, and Department of Rural Roads.

Table 5-7 Integrated development plans for artificial recharge system

Measures	Responsible Organization
1. Dredging of rivers to sand layer to increase flow velocity and increase recharge to groundwater.	Local administrative organizations
2. Construction of storage reservoirs to increase groundwater recharge and surface water storage for use in the dry season.	Royal Irrigation Department
3. Expansion of check dam construction projects and recharge weirs in the forest and national park areas.	Department of Forestry, Department of National Park Wildlife and Plant Conservation, Department of Local Government, Development military units
4. Promoting awareness and education in groundwater resource and significance of artificial recharge.	Department of Groundwater Resources
5. Preparing artificial recharge master plans and include as part of national water resources management.	Department of Groundwater Resources
6. Encouraging artificial recharge operation in the areas that suffer repeated drought hazard.	Local government organizations
7. Dredging of drainage canals in the highways areas to increase drainage efficiency and increase recharge.	Department of Highways, Department of Rural Roads, Local Government Organizations
8. Seeking cooperation from government offices to install rain harvesting recharge system to reduce surface run-off and restore groundwater resource.	Department of Groundwater Resources and Government Offices
9. Conservation and development of natural recharge areas such as old sand pits and public drainage canals.	Local Government Organizations
10. Encouraging the development of networks in groundwater observation wells system to monitor groundwater level, especially in areas where large amount of groundwater is used.	Department of Groundwater Resources

5.4 Important Issues

5.4.1 Guidelines for Preparing Artificial Recharge Master Plans

The master plans for artificial recharge in the Lower North Region river basin area-Pitsanulok, Sukhothai, and Pichit Provinces-consist of a body knowledge, related laws and regulations, planning, plan implementation, management, researches, and strategic implementation.

The success factors of the artificial recharge project development include project demand, raw water source, aquifer hydraulics, water quality, artificial recharge methods, with special considerations in the aspects of environment, legislations, socio-economy, management, and preparedness of the organizations. These must be carried out through related institutions and artificial recharge authorization.

The development of the artificial recharge projects should separate into 4 phases, namely, prefeasibility study, feasibility study, construction, and system operation and maintenance.

5.4.2 Guidelines for the Mitigation of Groundwater Level Decline Problem in the Study Area

The mitigation of groundwater level decline problem in the study areas using suitable artificial recharge methods identified from the results of mathematical groundwater modeling include:

1) Ban Nong Na area: groundwater recharge using recharge ponds should be applied and the amount of 0.23 million cubic meters of recharged water is required to achieve the groundwater balance in the area. The required recharge pond area is approximately 6 Rais. To raise 2 meters per year for the period of 10 years of the groundwater level, with continuing same pumping rate, the amount of 1.80 million cubic meters of recharged water and the recharge pond area of 11 Rais are required.

2) Regional study area: groundwater recharge using recharge ponds should be applied and the amount of 51 million cubic meters of recharged water is required to achieve the groundwater balance in the area. The required recharge pond area is approximately 1,400 Rais. To raise 2 meters per year-for the period of 10 years- of the groundwater level, with continuing same pumping rate, the amount of 927 million cubic meters of recharged water and the recharge pond area of 2,450 Rais are required.

3) Artificial recharge in the Lower North Region river basin should be performed using recharge ponds and old existing sand pits to achieve the groundwater balance within 10 years period. These would require the recharge pond areas of 8,075 Rais and the sand pit

areas of 2,550 Rais. The beneficial areas would cover approximately 146,700 Rais. To raise 2 meters per year-for the period of 10 years- of the groundwater level, with continuing same pumping rate in the critical areas where groundwater level deeper than 8 meters, the amount of 1,044 million cubic meters per year of recharged water and the recharge pond area of 16,388 Rais as well as old sand pit area of 2,550 Rais are required. The areas receiving benefits would cover approximately 365,000 Rais.

To achieve the successful development of the artificial recharge system, the Department of Groundwater Resources should follow the integrated development plans in cooperation with related government organizations such as local government agencies, Royal Irrigation Department, Department of Forestry, Department of National Parks, wildlife and Plant Conservations, Department of Highways, and Department of Rural Roads.

Chapter 6
Discussions and Recommendations

Further steps in artificial recharge operation using recharge pond should consider the following factors; related to the efficiency improvement of the constructed wetland, the evaluation of the aquifer clogging at depth and biochemical clogging process, aquifer contamination, and environmental and project extension impacts, as follows:

1) Efficiency improvement of the constructed wetland should be further evaluated to provide more information for recharge operation efficiency and sustainability as well as to reduce maintenance cost. The improvement of water quality using constructed wetland is achieved by the natural processes with no chemicals used. The important processes include sedimentation, assimilation by plant tissue, adsorption to soil particles, chemical precipitation, filtration through dead plants and microbes, and filtration through sediments (Hammer, 1989; Bavor and Mitchell, 1994). Additional study should be conducted and concentrate on; (i) the efficiency of the constructed wetland to remove the suspended solids up to about 90 percent by using various plants species and planted densities (suitable local plant is triangular papyrus); (ii) the amount of sediments removed; and (iii) water flow velocity. To control the turbidity of recharge water to the limit of less than 50 NTU, the water flow rate through the constructed wetlands should be maintained not greater than 10 cubic meters per hour and the turbidity of raw water at the constructed wetland inlet should be controlled not greater than 150 NTU. Long-term experiment (longer than 100 days) on sediments removal should be carried out with consultations from constructed wetland expert.

2) Evaluation of aquifer clogging at deep level and biochemical clogging: The clogging of the aquifer from recharge operation could occur at the recharge pond floor and at the soil strata below the recharge pond due to physical, chemical, or biological processes. Additional further study should be conducted to determine the depth of clogging in the soil strata by monitoring the water pressure and the water quality at the strata beneath the floor of the recharge pond as well as carry out detailed study of soils and porosity change both in laboratory experiment and field testing (Pavelic et al., 2007)

3) Contamination of the aquifer from recharge pond operation: The quality of surface water for recharge and baseline groundwater quality in the pilot project area must be evaluated to determine the potential contaminants that might affect groundwater usage for agriculture and domestic consumptions. Standard groundwater sampling and laboratory analyses must be applied to determine physical characteristics, major ions, heavy metals, fertilizers, herbicides and pesticides, organic substances as well as pathogenic microbes. The

monitoring of the raw water and groundwater water quality must be performed to evaluate the possible impacts from the recharge operation as well as to determine the potential groundwater contamination boundary.

4) Full scale project expansion and environmental impacts: Surface water quantity for recharge in the Ban Nong Na pilot project is considered very small. During the wet season, only 28,000 cubic meters of surface water are available and only 100,000 cubic meters are available for over the year. This would have no impacts to water availability and groundwater system in the area. For full scale project implementation, the following issues should be considered.

(4.1) Artificial recharge to maintain groundwater balance or to raise 2 meters of groundwater level would require approximately 700 sites of recharge systems. It is necessary to investigate and adopt the operation method that has no impacts to socio-economy of the down stream water users.

(4.2) Set up the format for recovery water uses: To achieve the optimum efficiency, institutions and authorizing agencies responsible for artificial recharge should be established. Full scale artificial recharge system management would assist in reducing the flood risk areas in the down stream side.

(4.3) The evaluation of surface water resources should be carried out to determine the annual flow quantity and peak flow period so as to set up the suitable artificial recharge period.

References

Abu-Taleb, M. F., 2003. Recharge of Ground-Water through Multi-Stage Reservoirs in a Desert Basin, Environmental Geology, 44:379-390.

Akan, A.O., 2006. Open Channel Hydraulics, Amsterdam: Elsevier.

American Society of Civil Engineers, 2001. Standard Guidelines for Artificial Recharge of Ground Water, EWRI/ASCE 34-01. ISBN: 0784405484.

Anbazhagan, S., Ramasamy, S.M., and Gupta, D.S., 2005. Remote Sensing and GIS for Artificial Recharge Study, Runoff Estimation and Planning in Ayyar Basin, Tamil Nadu. India Environ Geol, 48: 158-170.

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

Asano, T. 1985. Artificial Recharge of Ground-water, Butterworth Publishers, Boston, 767 pp.

Bavor, H.J., and Mitchell, D.S. 1994. Wetland Systems in Water Pollution Control [Eds.], Water Sci. Technol. 29(4), 336p.

Boogaard, F., Bruins, G., and Wentink, R., 2006. Wadi's: Aanbevelingen Voor Ontwerp, Aanleg en Beheer, Stichting RIONED.

Botzan, T.M., Necula, A.I., Marino, M.A., and Basa-gaoglu, H. 1999. Benefit-Cost Model for an Artificial Recharge Scenario in the San Joaquin Valley, California, Water Resources Management 13: 189-203.

Bouwer, H., 2002. Artificial Recharge of Groundwater: Hydrogeology and Engineering, Hydrogeology Journal, 10:121–142.

Bouwer, H., and Rice, R. C. 1989. Effect of Water Depth in Groundwater Recharge Basins on Infiltration Rate, Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 115(4): 556-568.

Braskerud, B.C. 2003. Clay particle retention in small constructed wetlands, Water Research 37 (2003) 3793–3802.

Brown, C.J., Hatfield, K., Newman M. 2006. Lessons Learned from a Review of 50 ASR Projects from the United States, England, Australia, India, and Africa, 2006 UCOWR Annual Conference Increasing Freshwater Supplies, Santa Fe, New Mexico, USA.

California Department of Water Resources (CDWR). 1991. California Well Standards, Water Wells, Monitoring Wells, Cathodic Protection Wells, Bulletin 74-90, Sacramento, CA.

Central Arizona Project. 2009. Agua Fria Recharge Project, Operations, http//:www.cap-az.com/operations/recharge/aguafria

Central Ground Water Board. 2000. Guide on Artificial Recharge to Ground Water, Ministry of Water Resources, New Delhi, May, 2000.

Central Groundwater Board. 2002. Master Plan for Artificial Recharge to Ground Water in India. Ministry of Water Resources, New Delhi, India.

Cruise, J.F., Sherif, M.M., and Singh, V. 2007. Elementary Hydraulics. Toronto, Thomson/ Nelson.

Dillon, P.J. 2005. Future Management of Aquifer Recharge, Hydrogeol J (2005) 13:313–316.

Dillon, P.J. and Molloy, R. 2006. Developing Aquifer Storage and Recovery (ASR) Opportunities in Melbourne, Technical Guidance for ASR, CSIRO Land and Water Science Report 4/06.

Dillon, P.J. and Pavelic, P. 1996. Guidelines on the quality of stormwater and treated wastewater for injection into aquifers for storage and reuse. Urban Water Research Association of Australia Research Report No. 109.

Dillon, P.J., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., and Ward, J. 2009. Managed Aquifer Recharge: An Introduction, Waterlines Report Series No. 13, Australia: the National Water Commission.

Domenico, P.A., and Schwartz, F.W. 1998. Physical and Chemical Hydrogeology, New York: John Wiley and Sons, 824 p.

Donovan, D.J., Katzer, T., Brothers, K., Cole, E., and Johnson, M. 2002. Cost-Benefit Analysis of Artificial Recharge in Las Vegas Valley, Nevada, J. Water Resour. Plng. and Mgmt., 128 (5): 356-365.

Dyhouse, G., Hatchett, J., and Benn, J. 2003. Floodplain Modeling using HEC-RAS, Waterbury,Conn.: Haestad Press.

Esfandiari-Baiat, M., and Rahbar, G. 2004. Monitoring of Inflow and Outflow Rate from Kaftari Artificial Recharge of Groundwater System in Dorz-Sayban Region in South-Eastern Iran.

FAO. 1992. Crop Water Requirements (Paper No 24), Rome.

FAO. 1998. Irrigation and Drainage (Paper No 56), Rome.

FAO. 2009. Infiltration Rate and Infiltration Test, Annex 2, http://www.fao.org/docrep/

Farr, E., and Henderson, W.C., 1986. Land Drainage, Longman Group Limited, New York.

Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO). 1984. Irrigation and Drainage (Paper No 24), Rome.

Fotheringham, S., Rogerson, P., 1995. Spatial Analysis and GIS, Taylor & Francis, London.

Fowler, L.C. 1995. Operation and maintenance of ground water facilities. American Society of Civil Engineers.

Ghayoumian, J., Mohseni Saravi, M., Feiznia, S., Nouri, B., and Malekian, A. 2007. Application of GIS Techniques to Determine Areas Most Suitable for Artificial

Groundwater Recharge in a Coastal Aquifer in Southern Iran, Journal of Asian Earth Sciences, 30: 364–374.

Guymon, G.L. 1994. Unsaturated Zone Hydrology, New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 210 pp.

Hammer, D.A. 1989. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural, Lewis Publishers, 831p.

Hansen, C.V. and Aucott, W.R. 2000. Status of Groundwater Level and Storage Volume in the Equus Beds Aquifer Near Wichita Kansas, January 2000-2003: U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 03-4298.

Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G. 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process, U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-92.

Harrington, C.A., Scholz, M., Heal, K., Keohane, J., Dunne, E., Gouriveau, F. and Mustafa, A. 2008. Constructed Farm Wetlands (CFW): Design Manual for Scotland and Northern Ireland. Report Prepared for the Northern Ireland Environment Agency and the Scottish Environment Protection Agency.

Hua, G.F., Zhua, W., Zhao, L.F., and Huang, J.Y. 2010. Clogging Pattern in Vertical-Flow Constructed Wetlands: Insight from a Laboratory Study, Journal of Hazardous Materials 180: 668-674.

Hydraulic Engineering Center, 2001. HEC-RAS River Analysis System, Users Manual, U.S. Army Corps of Engineers.

Jain, S.C. 2001. Open-Channel Flow, New York: Wiley.

Kadlec, R.H. and Knight, R.L. 1996. Treatment Wetlands, Florida: CRC Press, Inc.

Kahlown, M A. 2004. Leaky Dam to Rejuvenate Depleting Aquifers in Balochistan.

Kantawanichkul, S., Karnchanawong, S., and Jing, S.R. 2009. Treatment of Fermented Fish Production Wastewater by Constructed Wetland System in Thailand, Chiang Mai J. of Sci. Vol. 36(2) : 149-157.

McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chap. A1.

McDowell-Boyer, L.M., Hunt, J.R., and Sitar, N. 1986. Particle Transport through Porous Media, Water Resources Research, 22(13) 1901-21.

Mousavi, S.F., and Rezai, V. 1999. Evaluation of Scraping Treatments to Restore Initial Infiltration Capacity of Three Artificial Recharge Projects in Central Iran, Hydro-geology Journal, 7:490-500.

Murray,R., Tedoux, G., Ravenscroft, P., and Botha, F. 2007. Artificial Recharge Strategy, version 1.3, Department of Water Affairs and Forestry and Water Research Commission, South Africa.

Nadee, S., Srisuk, K., Sarapirom, P., Pavelic, P. and Uppasit, S. 2010. Field and Laboratory Experiments to Investigate Infiltration Processes and Clogging Effects from a Ponding Recharge System at Ban Nong Na, Bangrakum District, Phitsanulok Province, Lower Yom River Basin, Thailand, International Symposium on Managed Aquifer Recharge 7th, October 9-13, 2010. Abu Dhabi, United Arab Emirates.

Nissen-Petersen, E. 2006. Water from Roads, ASAL Consultants Ltd. for Danida in Kenia (Danish International Development Assistance), www.waterforaridland.com

OHL Brasil. 2007. Programa via de las agues, desarrollado por la concesionaria autovias, http://www.wbcsd.org/web/e3/partnerships/7Oct_WCF_BusinessNightSchoolPartnerships_ViadelasAguas.pdf

Oosterhuis, M., and Foekema, E. 2003. Bodembelasting van metalen in infiltratievoor-zieningen is gering, H2O. Volume 21; pp 24-26.

Page, D., Dillon, P.J., Purdie, M. and Rinck-Pfeiffer, S. 2006. A Risk Management Method for Stormwater Re-use. In: Delectic, A. and Fletcher, T. [Eds]. Proc. 7th International Conference on Urban Drainage Modelling and the 4th International Conference on Water Sensitive Urban Design; Book of Proceedings. Monash University, Clayton, Victoria, Australia, pp. 612-619.

Pavelic, P. 1996. International Experience: Aquifer Storage and Recovery, Section 1.

Pavelic, P. 2009. Advancements in Research and Adoption of Managed Aquifer Recharge in Australia.

Pavelic, P., Dillon, P.J., Barry, K.E., Vanderzalm, J.L., Correll, R.L., and Rinck-Pfeiffer, S.M. 2007. Water Quality Effects on Clogging Rates during Reclaimed Water ASR in Carbonate Aquifer, Journal of Hydrology, 334:1-16.

Pérez-Paricio, A. And Carrera, J., 1999. Clogging Handbook, EU Project on Artificial Recharge of Groundwater, Contract ENV4-CT95-0071, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain.

Poehrich, T. 1997. Aquifer Test for Window Version 2.5, Waterloo Hydrogeologic Inc.

Prommer, H. 2006. A Reactive Multicomponent Transport Model for Saturated Porous Media User's Manual Version 1.46.

Prudic, D.E. 1989. Document of a Computer Program to Simulate Stream-Aquifer Ralations using a Modular, Finite Difference, Groundwater Flow Model, U.S. Geological Survey, Open file report 88-729, 113 pp.

Prudic, D.E., Konikow, L.F., and Banta, E.R. 2004. A New Streamflow-Routing (SFR1) Package to Simulate Stream-Aquifer Interaction with MODFLOW-2000: U.S. Geological Survey Open file report 2004-1042.

Roberson, J.A., Cassidy, J.J., and Chaudry, M.H., 1998. Hydraulic Engineering, New York: Wiley.

Roehrich, T. 1997. Aquifer Test for Windows, version 2.54, Waterloo Hydrogeologic Inc.

Roscoe Moss Company, 1990. Handbook of Ground Water Development, Los Angeles: John Wiley & Sons, Inc.

s8684e/s8684e0a.htm.

Saraf, A., Kundu, P., and Sarma, B. 2004. Integrated Remote Sensing and GIS in Groundwater Recharge Investigation and Selection of Artificial Recharge Sites in a Hard Rock Terrain, Department of Earth Sciences, Indian Institute of Technology, Roorkee, ROORKEE-247667, India.

Saraf, A., Kundu, P., and Sarma, B. 2009. Integrated Remote Sensing and GIS in Groundwater Recharge Investigation and Selection of Artificial Recharge Sites in a Hard Rock Terrain, Department of Earth Sciences, Indian Institute of Technology, Roorkee, ROORKEE-247667, India.

Saykawlar, S., Sitiyod, P., Tiankham, K., and Meemotgit, W. 2000. Data Integration of Artificial Recharge for Sukhothai Groundwater Project, Zone I, Thailand, Symposium on Mineral, Energy, and Water Resources of Thailand : Toward the year 2000, October 28-29, 1999, Bangkok, Thailand.

Schlumberger Water Services. 2008. Visual MODFLOW Premium 4.3 User's Manual, Waterloo, Ontario, Canada.

Schmidt Ross, H.C, Ziegler, A.C., and Parkhurst, D.L. 2007. Geochemical Effects of Induced Stream-Water and Artificial Recharge on the Equus Beds Aquifer, South-Central Kansas, 1995-2004, USGS Scientific Investigations Report 2007-5025.

Schroeder, P. R., Lloyd, C.M., and Zappi, P.A. 1994. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP3) Model, Risk Reduction Engineering Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, OHIO, USA.

Srisuk, K., and Sriboonlue, V. 1997. Conceptual Groundwater Model for Saline Water and Saline Soils in the Chi-Mun Basin, Northeast Thailand, International Symposium on Hydrology and Water Resources for Research and Development in Southeast Asia and the Pacific at Mekong Royal Hotel, Nong Khai, Thailand, 16-19 December 1997, p. 235-253.

Todd, D.K., 1982. Groundwater Hydrology, 2ed. John Wiley and Sons, 535p.

Toth, J. 1986. Regional groundwater theory, consequences, applications. World Federation of Hungarians, Hungarian Academy of Sciences, Federation of Technical and Scientific Societies. Budapest, Hungary.

Toth, J., 1963. A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in a Small Drainage Basin: Jour. Geophys, Res, v. 68, p. 4795-4812. Also in benchmark Papers in Geology v. 72 Physical Hydrogeology, ed. by Freeze, R. A. and W. Back, Hutchison Ross Pub. Co., 1983, p. 328-345.

van Steenbergen, F., and Tuinhof, A. 2009. Managing the Water Buffer for Development and Climate Change Adaptation; Groundwater Recharge, Retention, Reuse and Rainwater Storage, International Hydrological Programme (IHP) of UNESCO.

Wu, J., Wu, Y., Lu, J., and Lee, L. 2007. Field Investigations and Laboratory Simulation of Clogging in Lixi Dam of Jinduicheng, China, Environ. Geol. 53:387-397.

Wu, Y., Tang Y., and Chengmin, H. 2009. Harvesting of Rainwater and Brooklets Water to Increase Mountain Agricultural Productivity: A Case Study from a Dry Valley of Southwestern China, Natural Resources Forum, 33, 1, 39 -48.

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.

กรมชลประทาน, 2540. การศึกษาเพื่อหาวิธีเหมาะสมเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำสำรองทางการเกษตร, โครงการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อการชลประทาน อำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย, เสนอโดย บริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ จำกัด และ Tahal Consulting Engineers LTD.

กรมชลประทาน, 2546. โครงการศึกษาเพื่อทำแผนหลักรองรับการพัฒนาแหล่งน้ำและปรับปรุงโครงการชลประทาน สำหรับแผนฯ 9, กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรธรณี, 2519. แผนที่ธรณีวิทยา มาตราส่วน 1 : 250,000, กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.

กรมทรัพยากรธรณี, 2529. รายงานวิชาการ ฉบับที่ สธว. 23/2529, สำนักธรณีวิทยา, กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรธรณี, 2539. แผนที่น้ำบาดาลจังหวัดสุโขทัย พิจิตร และพิษณุโลก, กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.

กรมทรัพยากรธรณี, 2543. โครงการสำรวจออกแบบการระบายน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล พื้นที่ลุ่มน้ำแม่อาว จังหวัดลำพูน, เสนอโดยบริษัท วอเตอร์ รีซอร์ซ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด.

กรมทรัพยากรธรณี, 2544. ธรณีวิทยาประเทศไทย, เฉลิมพระเกียรติพระบาทมเด็จพระเจ้าอยู่หัวเนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคล เฉลิมพระชนพรรษา 6 รอบ 5 ธันวาคม 2542, กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม, หน้า 199.

กรมทรัพยากรธรณี, 2545. โครงการศึกษาประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ ระยะที่ 3 และการสำรวจออกแบบระบบเติมน้ำ, เสนอโดยบริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ จำกัด และ Tahal Consulting Engineers LTD.

กรมทรัพยากรธรณี, 2549. รายงานวิชาการ ฉบับที่ สธว. 23/2549, กรุงเทพฯ: สำนักธรณีวิทยา,

กรมทรัพยากรธรณี, 2551. แผนที่ธรณีวิทยา มาตราส่วน 1: 50,000 ระวางอำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร (4942 II) ระวางอำเภอวชิรบารมี จังหวัดพิจิตร (5042 III), กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2548. โครงการศึกษาออกแบบก่อสร้างระบบเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล พื้นที่ลุ่มแม่น้ำชายฝั่งตะวันออก, เสนอโดยบริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ จำกัด.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2549. การศึกษาการใช้น้ำบาดาลร่วมกับน้ำผิวดินบริเวณภาคกลางตอนบน, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2550.รายงานวัดระดับน้ำบ่อสังเกตการณ์ภาคเหนือ, กรุงเทพฯ: สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (เล่มที่ 10/10), เสนอโดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น.

กรมพัฒนาที่ดิน, 2543. แผนที่กลุ่มชุดดิน มาตราส่วน 1:50,000 (รายงานการใช้ประโยชน์ที่ดินรายจังหวัด), กรุงเทพฯ.

กรมโยธาธิการ, 2541 ก. การศึกษาทดลองอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินบริเวณจังหวัดกำแพงเพชร, เสนอโดยศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กรมโยธาธิการ, 2541 ข. การศึกษาความเหมาะสมด้านวิศวกรรมโครงการอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินจังหวัดสุโขทัย โดยศูนย์บริการวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กรมอุตุนิยมวิทยา, 2552. ข้อมูลสภาพอากาศจังหวัดพิษณุโลก พิจิตร และสุโขทัย ปี 2540-2550, กรุงเทพฯ.

กรมอุตุนิยมวิทยา, 2553. ข้อมูลสภาพอากาศจังหวัดกำแพงเพชร ปี 2543-2552, กรุงเทพฯ.

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20, 2543. กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น, ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิชัย ศรีบุญลือ, 2552. อุทกวิทยา. ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร, 2552. แผนที่แสดงน้ำท่วมตั้งแต่เดือนพฤษภาคม - ตุลาคม 2549, http://www.thaiwater.net/current/FloodAugToSep49.html

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2552. Gross Provincial Product (2009 Edition), http://www.nesdb.go.th/

สุจยา ยอดเพชร และเดชา นาวานุเคราะห์, 2544. การศึกษาคุณภาพน้ำแม่น้ำยม, วารสารวิจัยและฝึกอบรม พ.ค.-ส.ค. 2544, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. หน้า 21-32.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
26/83 ซ.ท่านผู้หญิงพหล (ซอยงามวงศ์วาน 54)
ถ.งามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

เว็บไซต์ประชาสัมพันธ์โครงการ
www.gw-mar.com

ศูนย์วิจัยน้ำบาดาล
คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002
โทรศัพท์/โทรสาร : *6643-202-700*
Website : www.gwrckku.com
E-mail : gwrc@kku.ac.th