



รายงานการวิจัยและการพัฒนาการวิจัยการเกษตร ฉบับสมบูรณ์
เรื่อง
การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินเพื่อพัฒนาแนวทางการจัดการน้ำใต้ดิน
ในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ :
กรณีศึกษาโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน

ผู้วิจัย

รศ.ดร.อารียา ฤทธิมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

อ.ดร.ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการจัดการภัยพิบัติ มหาวิทยาลัยมหิดล

อ.ดร.ยุทธนา ตาละลักษณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทุนวิจัยมุ่งเป้าฯ ประจำปีงบประมาณ 2561

สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

รายงานการวิจัยและการพัฒนาการวิจัยการเกษตร ฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินเพื่อพัฒนาแนวทางการจัดการน้ำใต้ดิน
ในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ : กรณีศึกษาโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา
พนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

คณะผู้วิจัย

รศ.ดร.อารียา ฤทธิมา	หัวหน้าโครงการวิจัย
อ.ดร.ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์	ผู้ร่วมโครงการ
อ.ดร.ยุทธนา ตาละลักษมณ์	ผู้ร่วมโครงการ

สนับสนุนโดย

ทุนวิจัยมุ่งเป้าฯ ประจำปีงบประมาณ 2561
สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมมหาชน)

มีนาคม 2563

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินเพื่อพัฒนาแนวทางการจัดการน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ : กรณีศึกษาโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน” สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการพัฒนาศักยภาพการวิจัยการเกษตร (ทุนวิจัยมุ่งเป้าฯ ประจำปีงบประมาณ 2561) ตลอดระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักทรัพยากรน้ำบาดาลเขต 2 (สุพรรณบุรี) สำนักทรัพยากรน้ำบาดาลเขต 8 (ราชบุรี) กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กรมชลประทาน และกรมอุตุฯ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลวิจัย

ท้ายนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล หน่วยงานต้นสังกัดที่สนับสนุนปัจจัยเกื้อหนุนอื่น ๆ จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ไปด้วยดี

รศ.ดร.อารียา ฤทธิมา
หัวหน้าโครงการวิจัย

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	(i)
สารบัญเรื่อง	(ii)
สารบัญตาราง	(iii)
สารบัญภาพ	(iv)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	(v)
1. บทนำ	1-1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1-2
1.3 เป้าหมายของการวิจัย	1-3
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย	1-3
1.5 ขอบเขตการวิจัย	1-3
1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย	1-4
1.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	1-17
1.8 พื้นที่ศึกษา	1-54
2. เนื้อเรื่อง	2-1
2.1 ผลการรวบรวมข้อมูลวิจัย	2-1
2.2 ผลการวิเคราะห์ฐานข้อมูลน้ำใต้ดิน	2-1
2.3 ผลการเก็บตัวอย่างดินและการตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำภาคสนาม และผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดินในห้องปฏิบัติการ	2-11
2.4 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP	2-23
2.5 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS	2-22
2.6 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา	2-63
3. ข้อวิจารณ์	3-1
3.1 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง SWAP กับวิธีเอมไพริคัล	3-1
3.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS กับวิธีเอมไพริคัล	3-5
3.3 ผลกระทบของเหตุการณ์อุทกภัยปี พ.ศ. 2554 ต่อระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน	3-10
3.4 ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการเติมน้ำใต้ดิน	3-12
4. สรุปและข้อเสนอแนะ	4-1
4.1 สรุป	4-1
4.2 ข้อเสนอแนะ	4-3
เอกสารอ้างอิง	-

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

ภาคผนวก	หน้า
ภาคผนวก A การเก็บตัวอย่างดินและตรวจวัดข้อมูลจุดที่ 1 นาข้าว	A-1
ภาคผนวก B การเก็บตัวอย่างดินและตรวจวัดข้อมูลจุดที่ 2 พืชไร่	B-1
ภาคผนวก C การเก็บตัวอย่างดินและตรวจวัดข้อมูลจุดที่ 3 พืชผักสวนครัว	C-1
ภาคผนวก D ภาพประกอบการจัดฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง “การใช้งานแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน WETSPASS-SWAP และแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน MODFLOW” เมื่อวันที่ 26-27 กุมภาพันธ์ 2563	D-1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1-1	การป้อนข้อมูลเข้าแบบจำลอง SWAP และ WETSPASS
ตารางที่ 1-2	การป้อนข้อมูลเข้าแบบจำลอง VISUAL MODFLOW
ตารางที่ 1-3	สมการเอมไพริคัลและแนวทางการประยุกต์ใช้
ตารางที่ 1-4	แผนการถ่ายทอดองค์ความรู้จากผลการวิจัยสู่ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง
ตารางที่ 1-5	แผนการดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินงานจริง
ตารางที่ 1-6	วิธีการที่น้ำไหลเข้า (Inflows) และน้ำไหลออก (Outflows) จากชั้นหินอุ้มน้ำ
ตารางที่ 1-7	ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ของดิน
ตารางที่ 1-8	หลักเกณฑ์เบื้องต้นในการจำแนกดินตามขนาดอนุภาคโดยวิธี USDA
ตารางที่ 1-9	หลักเกณฑ์ในการจำแนกดินย่อยโดยวิธี USDA
ตารางที่ 1-10	หลักเกณฑ์การจำแนกดินโดยวิธี AASHTO
ตารางที่ 1-11	หลักเกณฑ์การจำแนกดินโดยวิธี USCS
ตารางที่ 1-12	สรุปสถิติข้อมูลอุทกนิยมนิเวศวิทยารายเดือนและรายปีในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง
ตารางที่ 2-1	สรุปรายละเอียดที่สำคัญของข้อมูลวิจัย
ตารางที่ 2-2	จำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินครอบคลุมจังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี นครปฐม สมุทรสาคร และสมุทรสงครามในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง
ตารางที่ 2-3	จำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินครอบคลุมจังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี นครปฐม สมุทรสาคร และสมุทรสงครามในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองที่ขออนุญาตใช้ตาม พระราชบัญญัติน้ำบาดาล
ตารางที่ 2-4	จำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่
ตารางที่ 2-5	รายละเอียดที่ตั้งของบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่
ตารางที่ 2-6	ข้อมูลลักษณะโครงการที่สำคัญ
ตารางที่ 2-7	ตำแหน่งและจุดเก็บข้อมูลตัวอย่างดิน
ตารางที่ 2-8	การเก็บข้อมูลตัวอย่างดินและลักษณะดิน
ตารางที่ 2-9	ผลการตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำภาคสนาม
ตารางที่ 2-10	ผลการจำแนกการกระจายตัวของอนุภาคดินโดยวิธี USDA
ตารางที่ 2-11	ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและพารามิเตอร์ดินที่ เกี่ยวข้อง
ตารางที่ 2-12	ข้อมูลที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS
ตารางที่ 2-13	ค่าความถี่ฝนสำหรับนำเข้าแบบจำลอง SWAP
ตารางที่ 2-14	รายละเอียดของพารามิเตอร์พืชสำหรับแบบจำลอง SWAP
ตารางที่ 2-15	รายละเอียดพารามิเตอร์ดินสำหรับแบบจำลอง SWAP
ตารางที่ 2-16	รายละเอียดกำหนดข้อมูลในส่วนการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth Section)

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 2-17 รายละเอียดข้อมูลนำเข้าหลักของแบบจำลอง SWAP	2-33
ตารางที่ 2-18 สรุปรายการข้อมูลสำหรับการดำเนินการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยแบบจำลอง SWAP	2-38
ตารางที่ 2-19 ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินของดินเหนียวโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560	2-38
ตารางที่ 2-20 ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินของดินร่วนโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560	2-39
ตารางที่ 2-21 ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินของดินร่วนปนทรายโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560	2-40
ตารางที่ 2-22 อัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปีเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่จากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560	2-42
ตารางที่ 2-23 ข้อมูลที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS	2-43
ตารางที่ 2-24 ข้อมูลทางอุทกวิทยาที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน WETSPASS	2-44
ตารางที่ 2-25 รายชื่อสถานีตรวจวัดน้ำฝน	2-44
ตารางที่ 2-26 รายชื่อสถานีอุตุนิยมวิทยา	2-48
ตารางที่ 2-27 รายละเอียดพารามิเตอร์การใช้ที่ดิน	2-49
ตารางที่ 2-28 พารามิเตอร์การใช้ที่ดินสำหรับการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS	2-52
ตารางที่ 2-29 รายละเอียดพารามิเตอร์ดิน	2-55
ตารางที่ 2-30 พารามิเตอร์ชนิดดินสำหรับการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS	2-58
ตารางที่ 2-31 รายละเอียดบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษา	2-59
ตารางที่ 2-32 ข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS สำหรับการจำลองแต่ละปี	2-61
ตารางที่ 2-33 ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560	2-62
ตารางที่ 2-34 ลักษณะชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินและลำดับการจัดแบ่งชั้นน้ำในพื้นที่ศึกษา	2-64
ตารางที่ 2-35 ข้อมูลการเติมน้ำเฉลี่ยรายปีและอัตราการคายระเหยน้ำของพืชแยกตามประเภทของการใช้ที่ดิน	2-66
ตารางที่ 2-36 สรุปรายละเอียดของการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน	2-67
ตารางที่ 2-37 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินจากการเปรียบเทียบแบบจำลอง	2-69

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 2-38 ช่วงข้อมูลสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำที่แนะนำโดย Domenico	2-71
ตารางที่ 2-39 สมดุลลงน้ำใต้ดินจากการจำลองในสภาวะไม่คงที่ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559	2-72
ตารางที่ 2-40 ข้อมูลสำหรับพิจารณาหาพื้นที่ที่เหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดินด้วยวิธีการรวมหลักเกณฑ์แบบถ่วงน้ำหนัก	2-76
ตารางที่ 3-1 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง SWAP กับวิธีเอมไพริกัลและความคลาดเคลื่อนในการปรับเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553	3-3
ตารางที่ 3-2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง SWAP กับวิธีเอมไพริกัลและความคลาดเคลื่อนในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560	3-4
ตารางที่ 3-3 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS กับวิธีเอมไพริกัลและความคลาดเคลื่อนในการปรับเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553	3-7
ตารางที่ 3-4 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS กับวิธีเอมไพริกัลและความคลาดเคลื่อนในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560	3-8

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1-1	1-5
ภาพที่ 1-2	1-7
ภาพที่ 1-3	1-10
ภาพที่ 1-4	1-12
ภาพที่ 1-5	1-18
ภาพที่ 1-6	1-22
ภาพที่ 1-7	1-22
ภาพที่ 1-8	1-23
ภาพที่ 1-9	1-27
ภาพที่ 1-10	1-29
ภาพที่ 1-11	1-31
ภาพที่ 1-12	1-33
ภาพที่ 1-13	1-34
ภาพที่ 1-14	1-35
ภาพที่ 1-15	1-36
ภาพที่ 1-16	1-37
ภาพที่ 1-17	1-38
ภาพที่ 1-18	1-39
ภาพที่ 1-19	1-42
ภาพที่ 1-20	1-43
ภาพที่ 1-21	1-44
ภาพที่ 1-22	1-44
ภาพที่ 1-23	1-45
ภาพที่ 1-24	1-45
ภาพที่ 1-25	1-47
ภาพที่ 1-26	1-50
ภาพที่ 1-27	1-54
ภาพที่ 1-28	1-55

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 1-29	สถิติภูมิอากาศในคาบ 10-30 ปี ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง	1-39
ภาพที่ 2-1	การใช้น้ำใต้ดินเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่	2-2
ภาพที่ 2-2	อัตราการสูบน้ำใต้ดินเพื่อธุรกิจอุตสาหกรรม	2-4
ภาพที่ 2-3	อัตราการสูบน้ำใต้ดินเพื่อธุรกิจการค้า	2-4
ภาพที่ 2-4	อัตราการสูบน้ำใต้ดินเพื่อธุรกิจบริการ	2-5
ภาพที่ 2-5	อัตราการสูบน้ำใต้ดินเพื่อการเกษตรกรรมเพาะปลูก	2-5
ภาพที่ 2-6	อัตราการสูบน้ำใต้ดินเพื่อการปศุสัตว์	2-5
ภาพที่ 2-7	อัตราการสูบน้ำใต้ดินเพื่อการอุปโภคบริโภค	2-6
ภาพที่ 2-8	การกระจายตัวของบ่อสูบน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน	2-7
ภาพที่ 2-9	เปรียบเทียบจำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินและอัตราการสูบน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการชลประทาน แม่กลองใหญ่และพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน	2-7
ภาพที่ 2-10	ระดับน้ำใต้ดินของบ่อสังเกตการณ์ตรวจวัดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559	2-10
ภาพที่ 2-11	ความแตกต่างของระดับน้ำใต้ดินในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งจากบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่	2-10
ภาพที่ 2-12	ระดับน้ำใต้ดินรายปีของบ่อสังเกตการณ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559	2-11
ภาพที่ 2-13	ตำแหน่งและจุดเก็บข้อมูลตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษา	2-12
ภาพที่ 2-14	ระดับความสูงของพื้นที่ในพื้นที่ศึกษา	2-12
ภาพที่ 2-15	การจำแนกชนิดดินในพื้นที่ศึกษา	2-13
ภาพที่ 2-16	การจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษา	2-14
ภาพที่ 2-17	จุดเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษา	2-16
ภาพที่ 2-18	ตัวอย่างดินที่จัดเก็บจากพื้นที่ศึกษา	2-17
ภาพที่ 2-19	การตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำด้วย Double-Ring Infiltrometer	2-18
ภาพที่ 2-20	การตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำด้วย Tension Infiltrometer	2-18
ภาพที่ 2-21	เปรียบเทียบอัตราการซึมของน้ำผ่านตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด	2-19
ภาพที่ 2-22	ผลการจำแนกชนิดดินโดยวิธี USDA	2-21
ภาพที่ 2-23	อุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำในห้องปฏิบัติการ	2-21
ภาพที่ 2-24	โครงสร้างของอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำในห้องปฏิบัติการ	2-22
ภาพที่ 2-25	ชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษา	2-23
ภาพที่ 2-26	ข้อมูลพื้นที่ที่ถูกแบ่งออกตามชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษา	2-25
ภาพที่ 2-27	ข้อมูลอุณหภูมิที่ถูกแบ่งออกตามชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษา	2-26
ภาพที่ 2-28	ข้อมูลอุณหภูมิมิถุนายน พ.ศ. 2543 (ค.ศ. 2000)	2-32

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 2-29	การกระจายตัวของอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายเดือนของดินเหนียวจากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560	2-41
ภาพที่ 2-30	การกระจายตัวของอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายเดือนของดินร่วนจากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560	2-41
ภาพที่ 2-31	การกระจายตัวของอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายเดือนของดินร่วนปนทรายจากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560	2-42
ภาพที่ 2-32	การกระจายตัวของฝนในพื้นที่ศึกษาโดยใช้วิธี Thiessen Polygon	2-46
ภาพที่ 2-33	การกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ศึกษา	2-47
ภาพที่ 2-34	การกระจายตัวของความเร็วลมเฉลี่ยเดือนกันยายนปี พ.ศ. 2553 ในพื้นที่ศึกษาโดยใช้วิธี IDW	2-48
ภาพที่ 2-35	การใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษา	2-51
ภาพที่ 2-36	ชนิดของดินในพื้นที่ศึกษา	2-57
ภาพที่ 2-37	การกระจายตัวของระดับน้ำใต้ดินเดือนกันยายนปี พ.ศ. 2553 ในพื้นที่ศึกษาโดยวิธีคริกิง	2-60
ภาพที่ 2-38	การกระจายตัวของอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายเดือนจากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560	2-63
ภาพที่ 2-39	แบบจำลองเชิงมโนทัศน์เพื่อจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา	2-66
ภาพที่ 2-40	การออกแบบกริดและขอบเขตของแบบจำลองในพื้นที่ศึกษา	2-67
ภาพที่ 2-41	ประสิทธิภาพของการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่	2-70
ภาพที่ 2-42	ประสิทธิภาพของการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะไม่คงที่	2-70
ภาพที่ 2-43	การกำหนดบ่อสูบน้ำเพื่อหาอัตราการสูบน้ำปลอดภัยในพื้นที่ศึกษา	2-73
ภาพที่ 2-44	เส้นชั้นแสดงค่าระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่ลดลงอันเนื่องมาจากการสูบน้ำใต้ดินในปี พ.ศ. 2543–2559 โดยแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน	2-74
ภาพที่ 2-45	แผนที่แสดงค่าความเหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดิน	2-77
ภาพที่ 2-46	แบบจำลอง 3 มิติ แสดงลักษณะชั้นน้ำใต้ดินและตำแหน่งของบ่อต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา	2-78
ภาพที่ 2-47	เส้นชั้นแสดงระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มสูงขึ้นในพื้นที่ศึกษาจากการจำลองเพิ่มบ่อเติมน้ำใต้ดินในปี พ.ศ. 2543–2559	2-78
ภาพที่ 2-48	ลักษณะตัวอย่างบ่อเติมน้ำใต้ดิน	2-80
ภาพที่ 2-49	ลักษณะตัวอย่างหน้าตัดบ่อเติมน้ำใต้ดิน	2-81
ภาพที่ 3-1	ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง SWAP และวิธีเอ็มไพริคัลที่ประมาณการจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายปีในการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543–2553	3-1

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3-16 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง WETSPASS และวิธี เอมไพริกัลที่ประมาณการจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายปีในการตรวจสอบความ ถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560	3-11
ภาพที่ 3-17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และ วิธีเอมไพริกัล CF ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560	3-12
ภาพที่ 3-18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และ วิธีเอมไพริกัล SF ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560	3-12
ภาพที่ 3-19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และ วิธีเอมไพริกัล KRF ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560	3-13
ภาพที่ 3-20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และ วิธีเอมไพริกัล BF ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560	3-13
ภาพที่ 3-21 แผนที่แสดงพื้นที่น้ำท่วมในพื้นที่ศึกษาในปี พ.ศ. 2554	3-14
ภาพที่ 3-22 แผนที่แสดงระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการจำลอง น้ำท่วมขังบนผิวดินในพื้นที่น้ำท่วมที่ระดับน้ำเฉลี่ย 0.50 เมตร เหนือระดับผิว ดิน	3-15
ภาพที่ 3-23 แผนที่แสดงความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ	3-16
ภาพที่ 3-24 แผนที่แสดงระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการจำลอง น้ำท่วมขังบนผิวดินในพื้นที่น้ำท่วมที่ระดับน้ำเหนือผิวดินเฉลี่ย 0.50, 0.80, 1.50 และ 2.00 เมตร	3-17
ภาพที่ 3-25 แผนที่แสดงระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการ เปลี่ยนแปลงอัตราการเติมน้ำใต้ดิน	3-18
ภาพที่ 3-26 ประสิทธิภาพของการปรับเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินภายใต้สภาวะ การไหลไม่คงที่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการเติมน้ำใต้ดิน	3-19

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

WEAP	แบบจำลองระบบการวางแผนและประเมินสถานการณ์น้ำ (Water Evaluation and Planning Model)
SWAP	แบบจำลองดิน-น้ำ-ภูมิอากาศ-พืช (Soil-Water-Atmosphere-Plant Model)
WETSPASS	แบบจำลอง WETSPASS (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under Quasi Steady State)
MODFLOW	แบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน (Model of Groundwater Flow)
GMKIP	โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ (Greater Mae Klong Irrigation Project)
RID	กรมชลประทาน (Royal Irrigation Department)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

แนวคิดการจัดการน้ำผิวดินร่วมกับน้ำใต้ดิน (Conjunctive Water Management) เป็นส่วนหนึ่งของหลักการบริหารจัดการน้ำแบบบูรณาการ (Integrated Water Resources Management, IWRM) (Global Water Partnership, 2000) ที่มุ่งเน้นที่จะเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านน้ำ (Water Security) ตามยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศของรัฐบาล และเป็นการบริหารจัดการน้ำแบบองค์รวมเพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรน้ำที่มีอยู่สูงสุด น้ำใต้ดิน (Groundwater) เป็นปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บหรือสะสมตัวอยู่ใต้ดิน โดยอาจสะสมตัวอยู่ตามรอยแตก รอยแยกของชั้นหิน หรืออาจสะสมตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดกรวด หรือเม็ดทรายใต้ผิวดิน (<https://th.wikipedia.org/>) น้ำใต้ดินนับได้ว่าเป็นทรัพยากรน้ำต้นทุนที่สำคัญนอกเหนือจากน้ำผิวดิน (Surface Water) จากฐานข้อมูลของ UNESCO ในปี ค.ศ. 1978 พบว่า 1.7% ของปริมาณน้ำที่มีอยู่ในโลกเป็นน้ำใต้ดินซึ่งมีเปอร์เซ็นต์สูงกว่าน้ำผิวดินและน้ำในบรรยากาศที่มีเพียงแค่ 0.1% เท่านั้น (Chow et al., 1988) ด้วยเหตุนี้ ความรู้ความเข้าใจถึงทรัพยากรน้ำใต้ดิน (Groundwater Resource) รวมถึงกระบวนการเติมน้ำใต้ดิน (Process of Groundwater Recharge) ที่ถูกต้อง นับได้ว่าเป็นส่วนที่สำคัญในการจัดการทรัพยากรน้ำใต้ดินให้เกิดการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน เนื่องจากสะท้อนถึงศักยภาพของแหล่งน้ำต้นทุนจากน้ำใต้ดินที่คาดว่าจะดึงไปใช้ได้ในอนาคต จากการศึกษาโครงการจัดทำแผนบูรณาการน้ำบาดาลร่วมกับน้ำผิวดินทั่วประเทศ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2554ก) และโครงการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองและลุ่มน้ำท่าจีนของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด, 2548) พบว่า ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองมีการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้ทั้งภาคเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม และภาคครัวเรือน และจากฐานข้อมูลน้ำใต้ดินของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองพบว่า มีการสูบน้ำไปใช้เพื่อการเกษตรกรรมทั้งในเขตพื้นที่ชลประทานของโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่และนอกเขตชลประทานโดยเฉพาะแถบจังหวัดกาญจนบุรี นครปฐม ราชบุรี สุพรรณบุรี สมุทรสาคร และสมุทรสงคราม โดยมีอัตราการสูบน้ำใต้ดินไปใช้เฉลี่ยอยู่ที่ 12.40 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และคุณภาพน้ำจัดอยู่ในประเภทน้ำจืดที่สามารถนำไปใช้ได้

ดังนั้น การศึกษาและวิจัยน้ำใต้ดินเพื่อวางแผนบูรณาการการใช้น้ำใต้ดินร่วมกับน้ำผิวดินให้เหมาะสมตลอดจนการกำหนดรูปแบบการจัดการน้ำใต้ดินที่เหมาะสมจึงมีส่วนสำคัญที่จะสร้างสมดุลระหว่างน้ำต้นทุนและการใช้น้ำเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเกิดความมั่นคงและยั่งยืนในระยะยาว

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันลุ่มน้ำแม่กลองจะมีศักยภาพน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำผิวดินค่อนข้างสูงเนื่องจากมีเขื่อนท่าหน้าที่เก็บกักน้ำในระบบอุทกวิทยาของลุ่มน้ำไม่ว่าจะเป็นเขื่อนศรีนครินทร์และเขื่อนวชิราลงกรณ และมีเขื่อนทดน้ำ ได้แก่ เขื่อนท่าทุ่งนาและเขื่อนแม่กลองทำหน้าที่ควบคุมน้ำและกระจายน้ำเข้าระบบชลประทาน นอกจากนี้ยังมีระบบคลองส่งน้ำซึ่งได้ออกแบบให้ทำหน้าที่ในการกระจายน้ำและส่งน้ำเข้าแปลงเพาะปลูกอย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองที่ผ่านมาพบว่า ประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำค่อนข้างน้อย รวมทั้งยังสามารถผันน้ำไปใช้ในพื้นที่ใกล้เคียง

ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจข้อมูลภาคสนามในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่และฐานข้อมูลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลพบว่า มีการสูบน้ำใต้ดินไปใช้ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองโดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อการเกษตรกรรมในไร่อ้อยและข้าวโพด การอุตสาหกรรมโดยเฉพาะการสูบน้ำใต้ดินไปใช้ในโรงงานกระดาษและโรงงานฟอกน้ำตาล รวมทั้งมีการสูบน้ำใต้ดินไปใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคในครัวเรือนโดยมีจำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินทั้งของภาครัฐและเอกชนกระจายทั่วทั้งพื้นที่

งานวิจัยนี้ได้เลือกโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลนเป็นพื้นที่ศึกษาในการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินเพื่อนำเสนอแนวทางการจัดการน้ำใต้ดิน โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลนเป็นโครงการทางตอนบนของโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองครอบคลุมพื้นที่ 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี (อ.ท่าม่วง/อ.ท่ามะกา/อ.พนมทวน/อ.ห้วยกระเจา) จังหวัดนครปฐม (อ.กำแพงแสน/อ.บางเลน) และจังหวัดสุพรรณบุรี (อ.สองพี่น้อง/อ.อู่ทอง) ในปัจจุบันมีการสูบน้ำใต้ดินไปใช้เสริมจากแหล่งน้ำผิวดินเพื่อทำการเกษตรกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ดอนที่ระบบชลประทานจากแหล่งน้ำผิวดินเข้าไปไม่ทั่วถึง หรือในบางพื้นที่จำเป็นต้องสูบน้ำจากคลองชลประทานมาใช้ทำให้เกษตรกรต้องรับภาระค่าใช้จ่ายตามมาเช่นเดียวกัน ทำให้เกษตรกรบางส่วนหันมาใช้น้ำใต้ดินซึ่งเป็นแหล่งน้ำในพื้นที่แทน ด้วยเหตุนี้ การศึกษาวิจัยถึงข้อมูลน้ำใต้ดิน สถานภาพของน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำใต้ดิน และปริมาณการใช้น้ำใต้ดิน ตลอดจนการวางแผนแนวทางการจัดการน้ำใต้ดินอย่างเป็นระบบจึงเป็นส่วนสำคัญเพื่อสร้างดุลยภาพระหว่างปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่และปริมาณการใช้น้ำในระยะยาว ซึ่งแนวทางการจัดการน้ำใต้ดินที่เหมาะสมจะสามารถลดปัญหาการลดลงของระดับน้ำใต้ดินหากมีปริมาณการใช้น้ำใต้ดินในพื้นที่สูงเกินพอดี หรืออาจจะส่งเสริมให้เพิ่มการใช้น้ำใต้ดินเพื่อขยายพื้นที่เกษตรกรรมที่ระบบชลประทานเข้าไปไม่ทั่วถึง หากศักยภาพน้ำใต้ดินในพื้นที่มีเพียงพอ งานวิจัยนี้ยังได้ผนวกแนวคิดในการจัดการน้ำและอุทกภัยในลุ่มเจ้าพระยา-ท่าจีนเพื่อนำเสนอแนวทางพัฒนาการเติมน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาในลุ่มน้ำแม่กลอง กล่าวคือผลพวงจากเหตุการณ์มหาอุทกภัย ปี พ.ศ. 2554 รัฐบาลโดยคณะกรรมการบริหารจัดการน้ำและอุทกภัย (กบอ.) ได้กำหนดให้พื้นที่บางส่วนในจังหวัดสุพรรณบุรีและนครปฐมเป็นพื้นที่รับน้ำนองหรือพื้นที่แก้มลิงเพื่อพักน้ำหลากชั่วคราวจากลุ่มน้ำเจ้าพระยาและท่าจีน ด้วยเหตุนี้ แนวคิดที่จะเพิ่มการเติมน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาโดยอาศัยน้ำส่วนเกินที่ระบายทิ้งจากลุ่มน้ำเจ้าพระยาและท่าจีนในช่วงฤดูฝนและช่วงอุทกภัยมาพักไว้ในพื้นที่จึงถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้เพื่อยืนยันผลว่าแนวทางการจัดการน้ำและอุทกภัยดังกล่าวนี้เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาแนวทางการจัดการน้ำใต้ดินในพื้นที่ที่จะช่วยเพิ่มการเติมน้ำใต้ดินในระบบ และยังเป็นการลดการสูญเสียน้ำโดยการระบายทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ในช่วงวิกฤตน้ำหลากอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นความพยายามที่จะพัฒนาและต่อยอดงานวิจัยจากสถาบันการศึกษาให้สอดคล้องนโยบายการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของชาติที่มุ่งเน้นที่จะเสริมสร้างความมั่นคงด้านน้ำ (Water Security) ในอนาคตเพื่อรองรับปัจจัยความผันแปรของแหล่งน้ำต้นทุนและความต้องการน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น โดยนำเสนอแนวคิดในการบูรณาการการใช้ทรัพยากรน้ำใต้ดิน (Groundwater) ร่วมกับทรัพยากรน้ำผิวดิน (Surface Water) เพื่อให้เกิดประโยชน์และความคุ้มค่าในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่โดย

เป็นการต่อยอดงานวิจัยจากโครงการวิจัยเรื่อง “การจัดการอ่างเก็บน้ำร่วมกับน้ำบาดาลในเขตโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ (Conjunctive Water Management Considering Reservoir–Aquifer Interaction for Greater Mae Klong Irrigation Project)” ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้มีดังนี้

- 1.2.1 ประยุกต์ใช้แบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge Model) ในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน–สองพี่น้อง–บางเลนเพื่อศึกษาสถานะภาพน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำใต้ดิน
- 1.2.2 นำเสนอรูปแบบในการจัดการน้ำใต้ดิน (Managed Groundwater Recharge, MGR) ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้น้ำใต้ดินในอนาคต

1.3 เป้าหมายของการวิจัย

เป้าหมายของการวิจัยเพื่อสนับสนุนการดำเนินงานของหน่วยงานภาครัฐในการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำแม่กลองอย่างมั่นคง โดยสามารถกำหนดรูปแบบที่เหมาะสมในการจัดการน้ำใต้ดินสำหรับใช้เป็นข้อมูลประกอบในการบริหารจัดการน้ำผิวดินร่วมกับน้ำใต้ดิน (Conjunctive Water Management) เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงด้านน้ำในอนาคต

1.4 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1.4.1 ทราบศักยภาพของแหล่งน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำใต้ดินในเขตพื้นที่ศึกษาจากผลลัพธ์ของแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินที่ประยุกต์ใช้
- 1.4.2 สามารถกำหนดรูปแบบที่เหมาะสมในการจัดการน้ำใต้ดินสำหรับใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการน้ำเพื่อเสริมสร้างความมั่นคงด้านน้ำในอนาคต
- 1.4.3 สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้เป็นข้อมูลประกอบในการจัดการน้ำผิวดินร่วมกับน้ำใต้ดินได้อย่างเหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุดในพื้นที่ศึกษา

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นความพยายามที่จะเชื่อมโยงเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาไว้แล้ว 3 แบบจำลอง ได้แก่ (1) แบบจำลองดิน–น้ำ–ภูมิอากาศ–พืช (Soil Water Atmosphere Plant Model, SWAP) แบบ 1 มิติ โดยมีลักษณะการประเมินพารามิเตอร์ของแบบจำลองในรูปแบบของ Semi–Distributed Numerical Model และ (2) แบบจำลอง WETSPASS (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under Quasi Steady State) ซึ่งเป็นแบบจำลองสมดุลของน้ำที่กระจายตัวตามพื้นที่ภายใต้สภาวะการไหลแบบสม่ำเสมอ (Steady State Spatially Distributed Water Balance Model) และจัดอยู่ในกลุ่มของแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge Model) และ (3) แบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน VISUAL MODFLOW แบบ 3 มิติ ที่มีการประเมินพารามิเตอร์ในลักษณะ Fully–Distributed Numerical Model ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่

ในเขตโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลนเพื่อประเมินสถานะน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำใต้ดินและนำเสนอรูปแบบการจัดการน้ำใต้ดินที่เหมาะสมโดยอาศัยแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน VISUAL MODFLOW ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความสมดุระหว่างการเติมน้ำใต้ดินในระบบและการใช้น้ำใต้ดินที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็นลำดับทั้งภาคการใช้น้ำในครัวเรือน อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม

1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.6.1 การรวบรวมข้อมูลวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

ข้อมูลวิจัยประกอบด้วยข้อมูลระดับปฐภูมิและพหุภูมิที่รวบรวมจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยข้อมูลที่สำคัญประกอบด้วย ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน ตำแหน่งบ่อสูบ ตำแหน่งบ่อสังเกตการณ์ ข้อมูลอัตราการใช้น้ำใต้ดิน ข้อมูลสภาพภูมิประเทศ ข้อมูลการใช้ที่ดิน ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ข้อมูลหน้าตัดดินและลักษณะทางธรณีวิทยา ข้อมูลระดับความสูงเชิงตัวเลข เป็นต้น รวมถึงข้อมูลภาคสนามเพื่อตรวจวัดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ดิน และสำรวจลักษณะการใช้น้ำใต้ดินในพื้นที่เขตโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน ข้อมูลที่รวบรวมได้จะถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือได้ของข้อมูลในเบื้องต้นก่อนนำมาใช้ในขั้นตอนถัดไป

1.6.2 การวิเคราะห์ฐานข้อมูลน้ำใต้ดิน

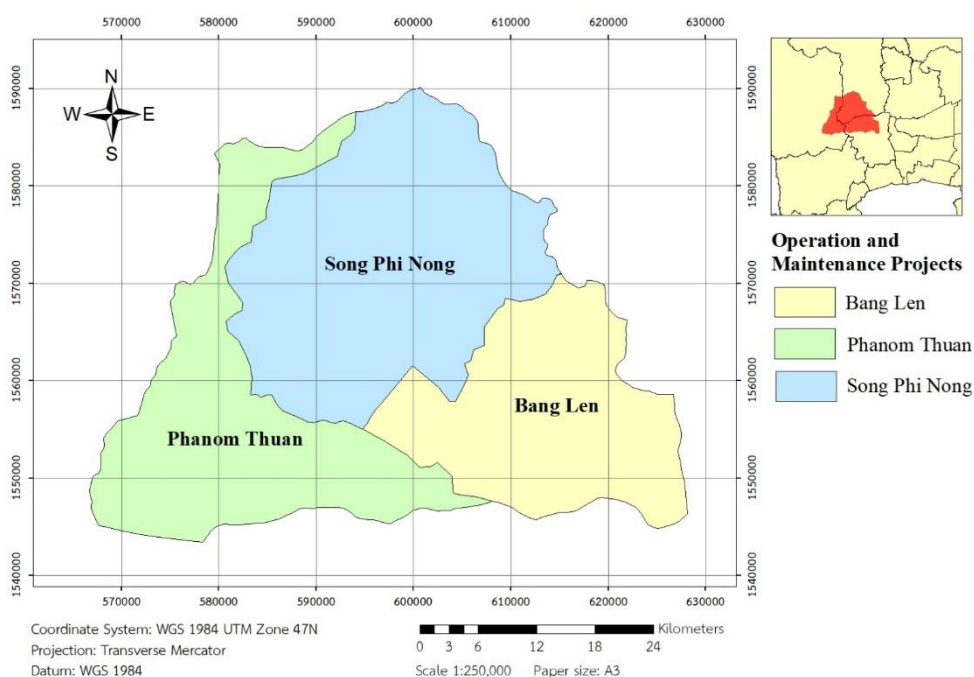
ข้อมูลระดับน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ (Observation Well) ที่รวบรวมได้ในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ซึ่งเป็นข้อมูลย้อนหลังในอดีตจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาแนวโน้ม การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge) รายปี และรายฤดูกาล (ฤดูฝนและฤดูแล้ง) และนำผลที่ได้มาศึกษาเปรียบเทียบกับข้อมูลในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลนเพื่อสนับสนุนสมมติฐานของโครงการวิจัยนี้

1.6.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge Model) และแบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow Model) ในพื้นที่ศึกษา

วัตถุประสงค์ของการขั้นตอนนี้ก็เพื่อประเมินศักยภาพของน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำใต้ดินโดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณการเติมน้ำใต้ดินในเขตพื้นที่ศึกษาโดยอาศัยแบบจำลอง ได้แก่ (1) แบบจำลองดิน-น้ำ-ภูมิอากาศ-พืช (Soil-Water-Atmosphere-Plant Model, SWAP) (2) แบบจำลอง WETSPASS (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under Quasi Steady State) และ (3) สมการเอมไพริคัล (Empirical Equation) ตลอดจนจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ด้วยแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน (Model of Groundwater Flow, VISUAL MODFLOW) โดยขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง (Modeling Process) มีดังนี้

1.6.3.1 ขั้นตอนที่ 1 : การกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาในแบบจำลอง SWAP-WETSPASS และ VISUAL MODFLOW

ในการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge Model) จะเริ่มต้นจากการกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาซึ่งครอบคลุม 3 โครงการย่อย ได้แก่ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน เนื่องจากอาศัยระบบคลองส่งน้ำ 1L และ 2L และระบบระบายน้ำร่วมกันดังแสดงในภาพที่ 1-1 นอกจากนี้ยังตั้งอยู่ทางบริเวณตอนบนของพื้นที่โครงการ โดยมีลักษณะการใช้ที่ดินเพื่อการเกษตรกรรมเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่อิทธิพลของการขยายตัวของชุมชนเมืองยังมีค่อนข้างน้อยซึ่งเอื้อต่อการปรับเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ตลอดจนนำเสนอรูปแบบการจัดการน้ำใต้ดินที่เหมาะสมในขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 1-1 การกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาในแบบจำลอง SWAP-WETSPASS-VISUAL MODFLOW

1.6.3.2 ขั้นตอนที่ 2 : การเตรียมข้อมูลป้อนเข้าแบบจำลอง

ขั้นตอนนี้จะทำการข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลอง SWAP-WETSPASS และแบบจำลอง VISUAL MODFLOW โดยรายละเอียดของข้อมูลที่สำคัญได้สรุปไว้ในตารางที่ 1-1 และตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1-1 การป้อนข้อมูลเข้าแบบจำลอง SWAP และ WETSPASS

ข้อมูลป้อนเข้า	รายละเอียดข้อมูล
ข้อมูลปริมาณฝน	ข้อมูลตรวจวัดความลึกฝนรายวันและรายเดือน
ข้อมูลการดักน้ำของพืช	ข้อมูลจากการวิเคราะห์รายวันและรายเดือน
ข้อมูลการคายระเหยน้ำของพืช	ข้อมูลจากการวิเคราะห์รายวันและรายเดือน
ข้อมูลอุณหภูมิต	ข้อมูลตรวจวัดเฉลี่ยรายวันและรายเดือน
ข้อมูลอุณหภูมิตสูงสุดและต่ำสุด	ข้อมูลตรวจวัดเฉลี่ยรายวันและรายเดือน

ตารางที่ 1-1 (ต่อ)

ข้อมูลป้อนเข้า	รายละเอียดข้อมูล
ข้อมูลความดันไอ	ข้อมูลจากการวิเคราะห์รายวันและรายเดือน
ข้อมูลความเร็วลม	ข้อมูลตรวจวัดเฉลี่ยรายวันและรายเดือน
ข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน	ข้อมูลตรวจวัดเฉลี่ยรายวันและรายเดือน
ตำแหน่งบ่อสำรวจ	พิกัด X-Y
ข้อมูลระดับความสูงเชิงเลข	–
ข้อมูลการใช้ที่ดิน	–
ข้อมูลลักษณะเนื้อดิน	–

ตารางที่ 1-2 การป้อนข้อมูลเข้าแบบจำลอง VISUAL MODFLOW

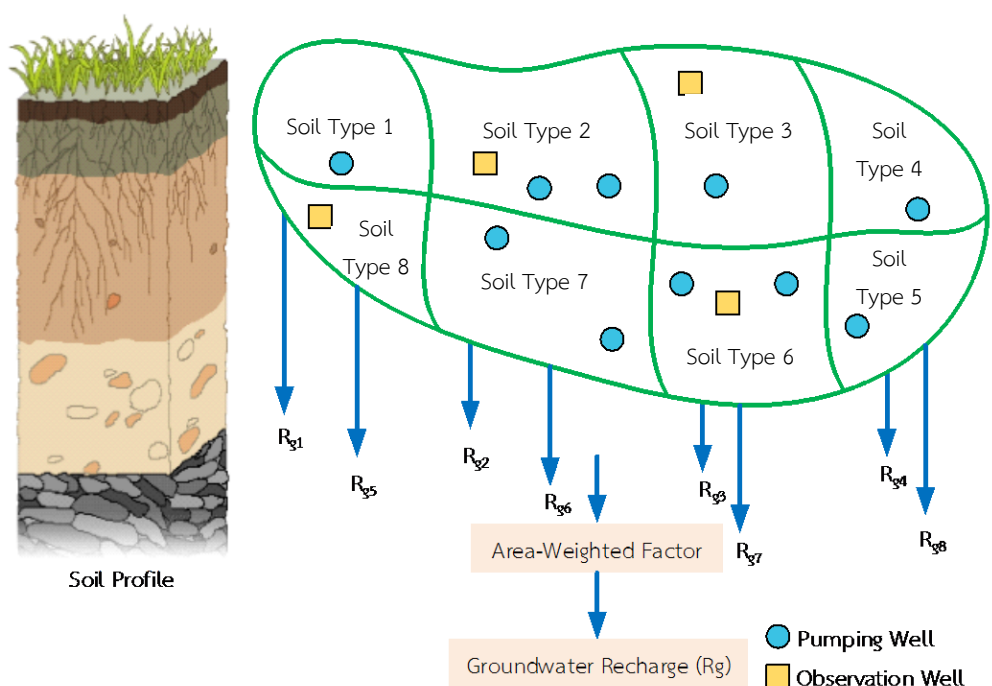
ข้อมูลป้อนเข้า	รายละเอียดข้อมูล
ข้อมูลระดับความสูงเชิงเลข	ระดับความสูงของผิวดิน
ข้อมูลหลุมเจาะ (Borehole)	ระดับความสูงของชั้นดิน
คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นดิน	ค่าความนำชลศาสตร์ (Hydraulic conductivity) ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storativity) และค่าความพรุน (Porosity) ของชั้นดิน
ข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน	ข้อมูลตรวจวัดเฉลี่ยรายวันและรายเดือน
ข้อมูลบ่อสูบน้ำใต้ดิน	ข้อมูลตรวจวัดเฉลี่ยรายวัน
ข้อมูลแม่น้ำ	ข้อมูลตรวจวัดเฉลี่ยรายเดือน
ข้อมูลการเติมน้ำใต้ดิน	ข้อมูลตรวจวัดเฉลี่ยรายปี
ข้อมูลการคายระเหยน้ำของพืช	ข้อมูลตรวจวัดเฉลี่ยรายปี
ข้อมูลน้ำท่วมขังบนผิวดิน	ข้อมูลตรวจวัดเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เกิดน้ำท่วมขัง

1.6.3.3 ขั้นตอนที่ 3 : การพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge Model) และแบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow Model) ในพื้นที่ศึกษา

■ แบบจำลอง SWAP และ WETSPASS

เนื่องจากแบบจำลองดิน-น้ำ-ภูมิอากาศ-พืช (Soil Water Atmosphere Plant Model, SWAP) เป็นแบบจำลองแบบ 1 มิติ โดยสามารถประเมินพารามิเตอร์ของแบบจำลองในรูปแบบของ Semi-Distributed Numerical Model เช่นเดียวกัน (2) แบบจำลอง WETSPASS (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under Quasi Steady State) จัดอยู่ใน

กลุ่มของแบบจำลอง 2 มิติ ซึ่งสามารถประเมินพารามิเตอร์ในรูปแบบของ Spatially Distributed Model ดังนั้น ในการพัฒนาแบบจำลองในพื้นที่ศึกษาซึ่งครอบคลุม 3 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาจะอาศัยข้อมูลในตารางที่ 1-2 มาเป็นข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลอง โดยจะทำการวิเคราะห์แยกตามชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษา (Soil Types) ซึ่งชนิดของดินในแต่ละแบบบ่งบอกถึงชนิดของพืชที่ปลูก (Crop Type) เพื่อหาอัตราการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge, R_g) ซึ่งจะทำให้ได้ค่า R_g ตามชนิดของดินในพื้นที่ (ชนิดพืชที่ปลูก) จากนั้นทำการวิเคราะห์ R_g ซึ่งเป็นตัวแทนในพื้นที่ศึกษาโดยนำแฟคเตอร์เชิงพื้นที่ (Area-Weighted Factor) มาร่วมพิจารณา ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงถึงสถานะน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ที่แสดงแนวคิดในการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินในภาพที่ 1-2



ภาพที่ 1-2 แนวคิดในการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง SWAP และ WETSPASS

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการลงพื้นที่สำรวจข้อมูลน้ำใต้ดินภาคสนามเพื่อพิจารณาทวนสอบข้อมูลปริมาณน้ำใต้ดินจากบ่อสูบ (Pumping Wells) และบ่อสังเกตการณ์ (Observation Wells) และทำการตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำภาคสนามโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำ 2 ชนิด คือ (1) เครื่องมือตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer) และ (2) เครื่องมือตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดแรงดึง (Tension Infiltrometer) รวมทั้งได้ทำการเก็บตัวอย่างดินซึ่งเป็นตัวแทนในพื้นที่ศึกษาโดยแยกตามชนิดดินหลักเพื่อนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ดินในห้องปฏิบัติการโดยครอบคลุมถึงการจำแนกการกระจายตัวของอนุภาคดินด้วยวิธี USDA การทดสอบการซึมผ่านของน้ำแบบความดันเปลี่ยน (Falling Head Permeability Test) และการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดินที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เช่น ความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ปริมาณน้ำในดินที่จุดอิ่มตัว (Saturated Water Content) และความจุน้ำสนาม (Field Capacity) เป็นต้น ซึ่งข้อมูลตรวจวัดน้ำใต้ดินภาคสนาม

และพารามิเตอร์ดินที่ทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการนี้จะถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของการเปรียบเทียบแบบจำลอง SWAP และ WETSPASS

สำหรับขั้นตอนของการเปรียบเทียบแบบจำลอง SWAP และ WETSPASS นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความคลาดเคลื่อนระหว่างผลที่ได้จากการจำลองและค่าที่ได้จากการตรวจวัดในพื้นที่จริงให้ได้มากที่สุด และช่วยประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองว่าสามารถยอมรับผลที่ได้จากแบบจำลองนั้น ๆ หรือไม่ ซึ่งทั้งแบบจำลอง SWAP และ WETSPASS เป็นแบบจำลองที่จำลองการซึมของน้ำผ่านชั้นดินไม่อิ่มตัว ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจำเป็นต้องเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่จะส่งผลต่อการจำลองเช่น ปริมาณน้ำหรือความชื้นในดิน ความจุน้ำสนาม ระดับเฮดน้ำใต้ดินเริ่มต้น และปริมาณการคายระเหยที่แท้จริง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดของทั้งสองแบบจำลองนี้มีลักษณะเป็นแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ จึงทำให้การนำผลที่ได้จากแบบจำลองไปใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจากพื้นที่จริงคือระดับน้ำใต้ดินที่ตำแหน่งบ่อสูบน้ำใด ๆ ไม่สามารถดำเนินการได้ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงพยายามที่จะหาเครื่องมืออย่างง่ายและรวดเร็วในการวิเคราะห์หาอัตราการเติมน้ำใต้ดินในเขตพื้นที่ศึกษาด้วยการประยุกต์ใช้สมการเอมไพริคัล (Empirical Equation) โดยเลือกใช้ 4 สมการหลัก ได้แก่ (1) สมการของ Chaturvedi (Chaturvedi Formula, CF) ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1973 (2) สมการของ Sehgal (Sehgal Formula, SF) ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1973 (3) สมการของ Krishna Rao (Krishna Rao Formula, KRF) ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1970 และ (4) สมการของ Bhattacharya (Bhattacharya Formula, BF) ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1954 ซึ่งกำหนดให้อัตราการเติมน้ำใต้ดินมีความสัมพันธ์กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายปี สำหรับรายละเอียดของแต่ละสมการเอมไพริคัลและแนวทางการประยุกต์ใช้ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1-3 ซึ่งในการศึกษานี้ได้อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่รวบรวมได้รายสถานีในพื้นที่ศึกษาและผ่านการแปลงค่าให้เป็นฝนเชิงพื้นที่ก่อนนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการเอมไพริคัลดังกล่าว การเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสองจะอาศัยชุดข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2553 และตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560 โดยได้พยายามจัดเตรียมข้อมูลอุตุวิทยานำเข้าในรูปแบบเดียวกันมากที่สุด

ตารางที่ 1-3 สมการเอมไพริคัลและแนวทางการประยุกต์ใช้

สมการเอมไพริคัล	สูตร	การประยุกต์ใช้
Chaturvedi Formula (Chaturvedi et al., 1973)	$R = 2.0(P-1.5)^{0.4}$ เมื่อ R = อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (นิ้วต่อปี) P = ปริมาณฝนรายปี (นิ้วต่อปี)	พัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับประเทศอินเดียเมื่อฝนรายปีสูงกว่า 15 นิ้วต่อปี
Sehgal Formula (Sehgal, 1973)	$R = 12.6(P-406.4)^{0.5}$ เมื่อ R = อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (มม.ต่อปี) P = ปริมาณฝนรายปี (มม.ต่อปี)	—

ตารางที่ 1-3 (ต่อ)

สมการเอมไพริกัล	สูตร	การประยุกต์ใช้
Krishna Rao Formula (Krishna, 1970)	$R = K(P-X)$ $R = 0.20(P-400)$; $P: 400-500$ $R = 0.25(P-400)$; $P: 600-1,000$ $R = 0.30(P-500)$; $P: 1,000-2,000$ $R = 0.35(P-600)$; $P: >2,000$ เมื่อ R = อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (มม.ต่อปี) P = ปริมาณฝนรายปี (มม.ต่อปี)	ใช้งานในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศใกล้เคียงกันทั่วทั้งพื้นที่
Bhattacharya Formula (Bhattacharya et al., 1954)	$R = 3.47(P-38)^{0.4}$ เมื่อ R = อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (มม.ต่อปี) P = ปริมาณฝนรายปี (ชม.ต่อปี)	—

1.6.3.4 ขั้นตอนที่ 4 : การศึกษาเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง

ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองข้างต้นจะแสดงผลในรูปของอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายเดือน รายฤดูกาลและรายปีซึ่งจะถูกนำมาศึกษาและเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงปริมาณกับผลที่ได้จากสมการเอมไพริกัลทั้ง 4 รูปแบบ ซึ่งในส่วนของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง SWAP สามารถแสดงผลค่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินแยกตามชนิดของดินในพื้นที่ศึกษาได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณการเติมน้ำรายปี และค่าปริมาณการเติมน้ำรายปีเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่โดยทำการวิเคราะห์จากข้อมูลสัดส่วนพื้นที่แยกตามชนิดของดินเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าที่ได้กับผลลัพธ์จากแบบจำลอง WETSPASS ได้นั่นเอง

1.6.3.5 ขั้นตอนที่ 5 : การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ขั้นตอนนี้เป็นการการประเมินประสิทธิภาพในทางสถิติของแบบจำลอง SWAP และ WETSPASS จากผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน โดยตั้งสมมุติฐานว่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากสมการเอมไพริกัลเป็นตัวแทนของข้อมูลสังเกตการณ์ โดยอาศัยค่าสถิติหลักได้แก่ ค่าความเบี่ยงเบนคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error, RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) ค่าความเบี่ยงเบนคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error, RMSE) โดยอาศัยสมการดังนี้

$$RMSE = [1/n \sum (R_{g\text{observed}} - R_{g\text{simulated}})^2]^{0.5} \quad \text{-----}(1-1)$$

เมื่อ $R_{g\text{observed}}$ = อัตราการเติมน้ำใต้ดินสังเกตการณ์จากสมการเอมไพริกัล

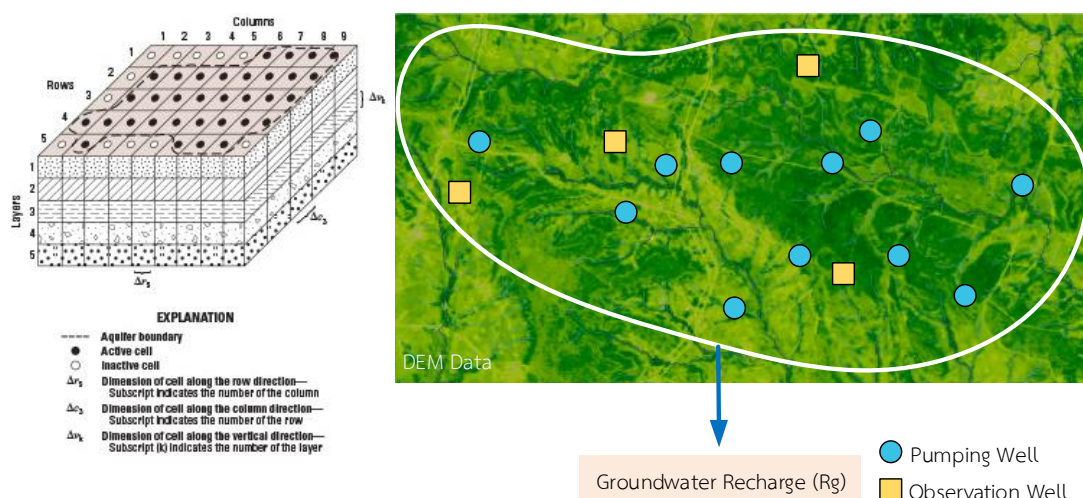
$R_{g\text{simulated}}$ = อัตราการเติมน้ำใต้ดินจากการจำลอง SWAP หรือ WETSPASS

โดยเมื่อค่า RMSE มีค่าเข้าใกล้ 0 เท่าไรค่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากการจำลองมีความแม่นยำขึ้นเท่านั้น

(2) ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจหรือ R-Squared โดยทำการพล็อตผลระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินสังเกตการณ์จากสมการเอมไพริคัลและอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากการจำลอง SWAP หรือ WETSPASS จากนั้นทำการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์และค่าสถิติ R-Squared

■ แบบจำลอง VISUAL MODFLOW

แนวทางในการพัฒนาแบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง VISUAL MODFLOW จะอาศัยข้อมูลในตารางที่ 1-2 ข้างต้นมาเป็นข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลอง ซึ่งในขั้นตอนของการพัฒนาแบบจำลองจะต้องกำหนดสภาพขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary Conditions) และขอบเขตแม่น้ำ (River Package) ในพื้นที่ศึกษา รวมถึงค่าระดับเฮดน้ำใต้ดินเริ่มต้น (Initial Head) จากบ่อสังเกตการณ์ (Observation Wells) อัตราการสูบน้ำใต้ดินจากบ่อสูบ (Rate of Pumping Yield) อัตราการคายระเหยน้ำของพืช (Evapotranspiration) เป็นต้น สำหรับการจำลองระบบและปรับเทียบแบบจำลอง (Model Simulation and Calibration) จะเป็นการจำลองผลและปรับเทียบแบบจำลองจนกระทั่งผลลัพธ์ที่ได้สะท้อนภาพรวมของสถานะต้นทุนจากแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา ซึ่งข้อมูลตรวจวัดน้ำใต้ดินภาคสนามและพารามิเตอร์ดินที่ได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการข้างต้นจะนำมาพิจารณาปรับเทียบพารามิเตอร์ในแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด พารามิเตอร์หลักที่นำมาพิจารณาปรับเทียบในแบบจำลอง VISUAL MODFLOW ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวราบ (Hydraulic Conductivity, Kh) ค่าสัมประสิทธิ์การกักกัก (Storage Parameter, Ss และ Sy) และทำการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยอาศัยเครื่องมือทางสถิติในรูปของค่าความเบี่ยงเบนคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error, RMSE) และทำการวิเคราะห์การนำเข้าสู่ข้อมูลการเติมน้ำใต้ดินที่ทำการปรับเทียบในแบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดิน VISUAL MODFLOW และให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองที่น่าพอใจที่สุดในภาพที่ 1-3



ภาพที่ 1-3 การนำเข้าสู่ข้อมูลการเติมน้ำใต้ดินในการพัฒนาแบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง VISUAL MODFLOW

แบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินที่ได้จากการเปรียบเทียบจนกระทั่งได้ประสิทธิผลของผลลัพธ์จากแบบจำลองจนเป็นที่น่าพอใจแล้วจะถูกนำมาจำลองสมมูลบนน้ำใต้ดินระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2543-2559 ทำการวิเคราะห์อัตราการสูบน้ำที่ปลอดภัย (Permissible Yield) และประเมินระดับน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่ลดลงที่เกิดขึ้นจากการสูบน้ำใต้ดินจากในอดีตถึงปัจจุบัน รวมทั้งทำการจำลองผลกระทบของเหตุการณ์อุทกภัยที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2554 ต่อระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาอีกด้วย

1.6.4 การนำเสนอรูปแบบในการจัดการน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

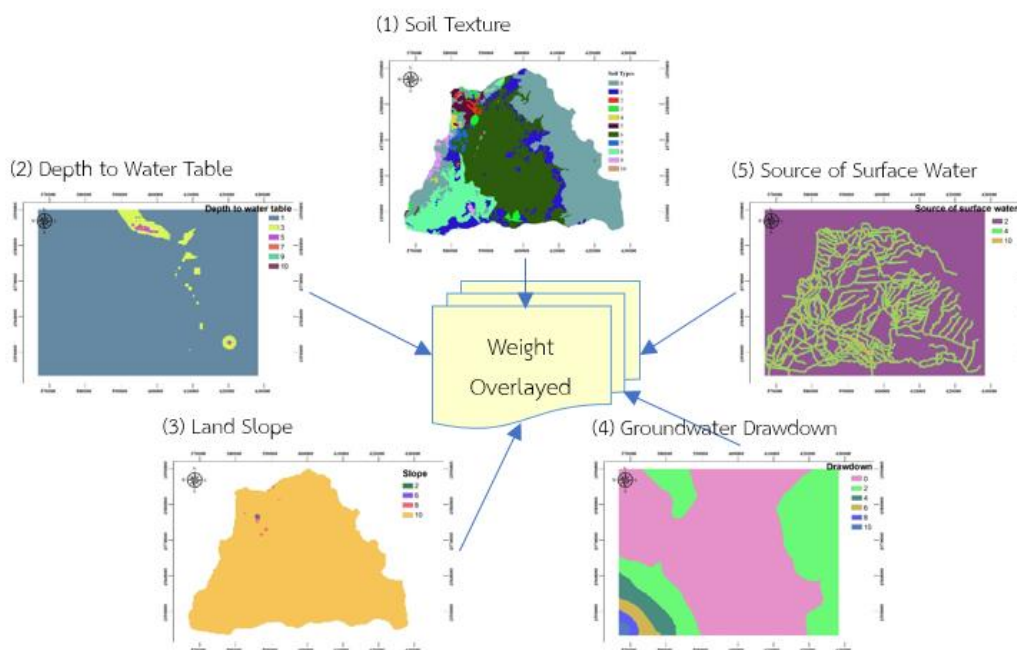
ในขั้นตอนนี้ได้อาศัยแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน (Model of Groundwater Flow, VISUAL MODFLOW) ที่จำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาข้างต้นมาใช้ในการนำเสนอรูปแบบการจัดการน้ำใต้ดินที่เหมาะสมในลักษณะของการเพิ่มการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินเพื่อให้เกิดดุลยภาพระหว่างปริมาณน้ำต้นทุนและปริมาณการสูบน้ำไปใช้ สำหรับแนวคิดและการพัฒนาแบบจำลอง (Modeling Process) มีรายละเอียดดังนี้

1.6.4.1 แนวคิดในการพัฒนารูปแบบการจัดการเพื่อเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

แนวคิดของงานวิจัยนี้คือนำเสนอรูปแบบของการจัดการน้ำใต้ดินที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติของพื้นที่ศึกษาเพื่อเพิ่มการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (Managed Aquifer Recharge, MAR) โดยอาศัยแนวคิดในการเติมน้ำด้วยหลุมอัดน้ำ (Injection Well) นอกเหนือจากกระบวนการทางธรรมชาติเดิมอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝน ทั้งนี้เพื่อรักษาระดับน้ำใต้ดินให้คงที่หรือสูงขึ้นจากแนวทางปฏิบัติที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน จากการตรวจสอบเอกสารพบว่าวิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่างจังหวัดพิษณุโลก สุโขทัย และพิจิตร ซึ่งศึกษาไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2554) โดยผลจากการศึกษาให้ข้อสรุปว่าการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการลดระดับน้ำใต้ดิน และยังช่วยบรรเทาปัญหามลพิษและน้ำท่วม ตลอดจนควรเพิ่มความเข้าใจในคุณค่าของแหล่งน้ำใต้ดินและให้ความสำคัญกับการเติมน้ำใต้ดิน พร้อมทั้งควรจัดทำแผนหลักการเติมน้ำใต้ดินและผลักดันให้เป็นส่วนหนึ่งของการจัดการทรัพยากรน้ำของชาติ

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเติมน้ำด้วยหลุมอัดน้ำโดยแหล่งน้ำที่จะนำมาเติมพิจารณาจากปริมาณน้ำผิวดินจากระบบคลองส่งน้ำในลุ่มน้ำแม่กลอง และประยุกต์ใช้วิธีการรวมหลักเกณฑ์แบบถ่วงน้ำหนัก (Simple Additive Weighting, SAW Method) ด้วยเครื่องมือระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System, GIS) มาใช้ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการเติมน้ำใต้ดิน ซึ่งข้อมูลที่น่ามาพิจารณาหาพื้นที่ที่เหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดินในการศึกษานี้ประกอบด้วย (1) เนื้อดิน (Soil Texture) (2) ความลึกจากผิวดินถึงระดับน้ำใต้ดิน (Depth to Water Table) (3) ระดับน้ำใต้ดินที่ลดลง (Groundwater Drawdown) (4) ระยะทางจากแหล่งน้ำผิวดิน (Distance from Source of Surface Water) และ (5) ความลาดชันของพื้นดิน (Land Slope) ดังแสดงหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ที่เหมาะสมในภาพที่ 1-4 สำหรับผลที่ได้จากการศึกษานี้ทำให้

ทราบตำแหน่ง จำนวนหลุมอัดน้ำ และอัตราการเติมน้ำที่เหมาะสมในเบื้องต้นจากการพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ หลังจากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้เป็นข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน VISUAL MODFLOW เพื่อจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นหลังมีการนำเสนอรูปแบบการจัดการเพื่อเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน



ภาพที่ 1-4 หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ที่เหมาะสมในการพัฒนารูปแบบการจัดการเพื่อเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

1.6.4.2 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินโดยนำเสนอรูปแบบการจัดการเพื่อเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินโดยนำเสนอรูปแบบการจัดการเพื่อเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาด้วยแบบจำลอง VISUAL MODFLOW นั้นจะเพิ่มเติมองค์ประกอบของหลุมอัดน้ำและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในระบบจากแบบจำลองที่ได้พัฒนามาแล้วข้างต้น จากนั้นจำลองผลสภาพการไหลของชั้นน้ำใต้ดินหลังมีหลุมอัดน้ำเพื่อเปรียบเทียบกับก่อนมีหลุมอัดน้ำในพื้นที่ โดยแนวทางดังกล่าวต้องแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการจัดการที่ทำให้เพิ่มปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินให้สูงขึ้น

1.6.5 การจัดประชุมและฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้จากผลการวิจัยสู่ผู้ปฏิบัติงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการจัดประชุมเพื่อนำเสนอแนวคิด หลักการ สมมุติฐาน และข้อสรุปจากงานวิจัยเมื่องานวิจัยบรรลุผลสำเร็จ และฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการในการใช้งานแบบจำลองถ่ายทอดองค์ความรู้จากผลการวิจัยสู่ผู้ปฏิบัติงานตามรายละเอียดในตารางที่ 1-4

ตารางที่ 1-4 แผนการถ่ายทอดองค์ความรู้จากผลการวิจัยสู่ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง

แผนงานที่	หัวข้ออบรม	กลุ่มเป้าหมาย	จำนวนกลุ่มเป้าหมาย	วันเวลา-สถานที่จัดงาน
1	การนำเสนอ สาธิตและฝึกปฏิบัติการการใช้งานแบบจำลองแบบจำลองดิน-น้ำ-ภูมิอากาศ-พืช (Soil-Water-Atmosphere-Plant Model, SWAP)	ตัวแทนจากหน่วยงานหลัก ได้แก่ (1) ฝ่ายบริหารและจัดการน้ำของโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ สำนักชลประทานที่ 13 (2) สำนักทรัพยากรน้ำบาดาลเขต 2 (สุพรรณบุรี) (3) สำนักทรัพยากรน้ำบาดาลเขต 8 (ราชบุรี) และสถาบันการศึกษาต่าง ๆ	ไม่น้อยกว่า 20 คน	วันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563 สถานที่จัดงาน ม.มหิดล
2	การนำเสนอ สาธิตและฝึกปฏิบัติการการใช้งานแบบจำลอง WETSPASS (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under Quasi Steady State)	ตัวแทนจากหน่วยงานหลัก ได้แก่ (1) ฝ่ายบริหารและจัดการน้ำของโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ สำนักชลประทานที่ 13 (2) สำนักทรัพยากรน้ำบาดาลเขต 2 (สุพรรณบุรี) (3) สำนักทรัพยากรน้ำบาดาลเขต 8 (ราชบุรี) และสถาบันการศึกษาต่าง ๆ	ไม่น้อยกว่า 20 คน	วันที่ 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563 สถานที่จัดงาน ม.มหิดล

ตารางที่ 1-4 (ต่อ)

แผนงานที่	หัวข้ออบรม	กลุ่มเป้าหมาย	จำนวนกลุ่มเป้าหมาย	วันเวลา-สถานที่จัดงาน
3	จัดประชุมเพื่อนำเสนอแนวคิด หลักการ สมมุติฐาน การพัฒนา แบบจำลอง VISUAL MODFLOW และข้อสรุปจากงานวิจัย	ตัวแทนจากหน่วยงานหลัก ได้แก่ (1) ฝ่ายบริหารและจัดการน้ำของ โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ สำนักชลประทานที่ 13 (2) สำนัก ทรัพยากรน้ำบาดาลเขต 2 (สุพรรณบุรี) (3) สำนักทรัพยากร น้ำบาดาลเขต 8 (ราชบุรี) และ สถาบันการศึกษาต่าง ๆ	ไม่น้อยกว่า 20 คน	วันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563 สถานที่จัดงาน ม.มหิดล

ตารางที่ 1-5 แผนการดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินงานจริง

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. การรวบรวมข้อมูลวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น												
2. การวิเคราะห์ฐานข้อมูลน้ำใต้ดิน												
3. การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge Model) ในพื้นที่ศึกษา - แบบจำลอง SWAP - แบบจำลอง WETSPASS - สมการเอมไพริกัล												
4. การนำเสนอรูปแบบในการจัดการน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา - การวิเคราะห์สมดุลน้ำในระบบ - การพัฒนาแบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินโดยนำเสนอรูปแบบการจัดการเพื่อเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง VISUAL MODFLOW												
5. การจัดประชุมและอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้จากผลการวิจัยสู่ผู้ปฏิบัติงาน - แผนงานที่ 1 - แผนงานที่ 2 - แผนงานที่ 3												
6. การจัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์												

หมายเหตุ :  แผนการดำเนินงาน  ผลการดำเนินงานจริง

1.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.7.1 การเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge)

การเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge) หมายถึงปริมาณน้ำที่ไหลลงไปเติมในระบบชั้นน้ำใต้ดินโดยเป็นปริมาณน้ำที่หักลบจากปริมาณความชื้นในดินบริเวณเขตรากพืชและปริมาณการคายระเหยของพืช ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ไหลผ่านกระบวนการไหลซึมลึกลงไปเลยเขตชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มระดับน้ำใต้ดิน หรืออาจกล่าวได้ว่าการเติมน้ำใต้ดินเป็นการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน โดยปริมาณน้ำที่เพิ่มเติมให้กับชั้นหินอุ้มน้ำ (Recharge) คือน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินชั้นหินลงไปจนถึงระดับน้ำใต้ดิน และเป็นส่วนเพิ่มเติมให้กับน้ำใต้ดินที่กักเก็บอยู่แล้ว

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดน้ำสำคัญที่ลงไปเติมให้กับชั้นหินอุ้มน้ำ ได้แก่ น้ำฝน ซึ่งจะมีความไม่แน่นอนทั้งในแง่ของสถานที่และเวลา ในภูมิภาคเขตร้อนชื้นอย่างประเทศไทยพบว่าปริมาณน้ำที่ลงไปเติมให้กับชั้นหินอุ้มน้ำจะเกิดในช่วงฤดูฝน ซึ่งเป็นช่วงที่การระเหยน้ำมีปริมาณน้อยและความชื้นในดินมีอยู่ในปริมาณสูงเนื่องจากฝนที่ตกเป็นระยะ ช่วงที่น้ำลงไปเติมในปริมาณมากมักจะเป็นช่วงหลังจากฤดูฝนไปได้ระยะหนึ่ง ในขณะที่ฤดูร้อน ความชื้นในดินจะน้อยมาก ในขณะที่การคายระเหยของน้ำจะสูง ปริมาณฝนตกน้อยทำให้ปริมาณน้ำที่ลงไปเติมมีน้อยมากหรือไม่เลย ยกเว้นในบางกรณีที่มีฝนตกมากและเป็นระยะเวลานาน อาจมีน้ำลงไปเติมบ้าง ในขณะที่ฤดูหนาว การคายระเหยน้ำค่อนข้างต่ำ มีความชื้นในดินพอสมควร แต่มีปริมาณฝนตกน้อย ทำให้ปริมาณน้ำที่ลงไปเติมน้อยเช่นกัน

ปริมาณน้ำฝนที่ซึมผ่านลงไปเติมให้กับชั้นหินอุ้มน้ำ หรืออีกนัยหนึ่งซึมผ่านลงไปจนถึงระดับน้ำใต้ดินเป็นเพียงส่วนน้อยของปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาในแต่ละปี ส่วนใหญ่ของน้ำฝนจะกลายป็นน้ำไหลบ่าไปตามหน้าดินลงสู่แม่น้ำ ลำธาร ในขณะที่อีกส่วนกลับคืนสู่บรรยากาศจากกระบวนการคายระเหยน้ำ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ซึมลงไปเติมให้กับชั้นหินอุ้มน้ำ ได้แก่ คุณลักษณะและความหนาของชั้นดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน ลักษณะภูมิประเทศ พืชคลุมดิน ลักษณะการใช้ที่ดิน ปริมาณความชื้นในดิน ความลึกถึงระดับน้ำใต้ดิน ความหนาแน่นและระยะเวลาที่ฝนตก อุณหภูมิอากาศและความชื้นในอากาศ และอื่นๆ จะเห็นได้ว่ามีปัจจัยที่จะควบคุมกลไกและปริมาณของน้ำฝนที่จะลงไปเติมให้กับชั้นหินอุ้มน้ำเป็นจำนวนมาก จึงทำให้การศึกษาเพื่อคำนวณและประเมินปริมาณน้ำที่ลงไปเพิ่มเติม (Recharge Quantity) เป็นเรื่องยากและซับซ้อน สำหรับวิธีการที่น้ำสามารถไหลซึมเข้าสู่ชั้นหินอุ้มน้ำและไหลออกจากชั้นหินอุ้มน้ำมีหลายวิธีดังแสดงในตารางที่ 1-6

ตารางที่ 1-6 วิธีการที่น้ำไหลเข้า (Inflows) และน้ำไหลออก (Outflows) จากชั้นหินอุ้มน้ำ

น้ำไหลเข้า	น้ำไหลออก
น้ำฝนส่วนที่ซึมผ่านผิวดินลงไป	น้ำพุ น้ำซึม น้ำซบ
น้ำไหลล้นตามผิวดินและไหลผ่านบริเวณที่มีความซึมได้ต่ำสู่บริเวณที่มีความซึมได้สูง	น้ำบาดาลที่ไหลล้น (Groundwater Runoff)
การอัดเติมน้ำที่มนุษย์ทำขึ้น (Artificial Recharge)	การรั่วซึมจากชั้นหินอุ้มน้ำลงสู่ทะเลมหาสมุทร

ตารางที่ 1-6 (ต่อ)

น้ำไหลเข้า	น้ำไหลออก
การรั่วซึม (Leakage) จากชั้นหินอุ้มน้ำหนึ่งไปสู่อีกชั้นหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นทั้งในแนวราบและแนวตั้ง	การคายระเหยของน้ำโดยตรงออกจากชั้นหินอุ้มน้ำ
น้ำส่วนเกินจากน้ำชลประทาน (Excess Irrigation)	การสูญเสียผ่านทางน้ำ คู คลอง และอื่น ๆ
การรั่วซึมจากสิ่งก่อสร้างทางวิศวกรรมต่าง ๆ เช่น อ่างเก็บน้ำ ทางระบาย/ส่งน้ำ	การสูบน้ำขึ้นมาใช้ (Abstraction)

ประเภทของน้ำที่ไหลลงไปเติมให้กับชั้นหินอุ้มน้ำนั้นมีการเคลื่อนที่ที่ต่างกัันดังภาพที่ 1-5 โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

(1) น้ำที่ซึมลงไปเติมโดยตรง (Direct Recharge)

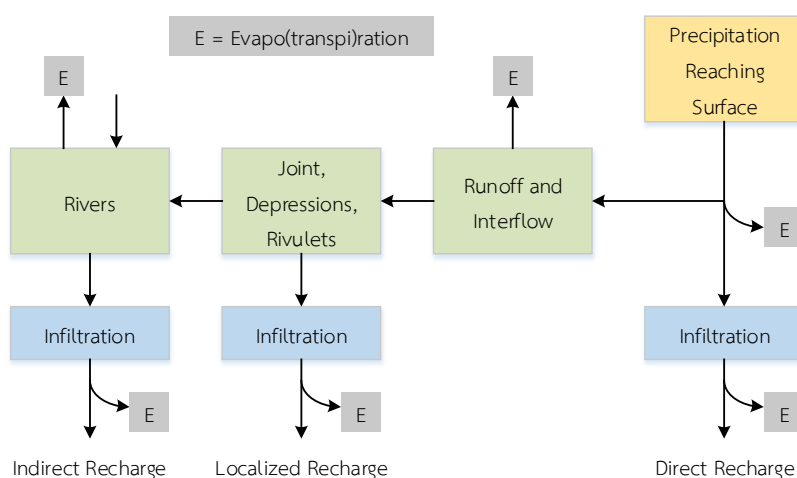
น้ำที่ซึมลงไปเติมโดยตรง (Direct Recharge) หมายถึง น้ำที่ซึมผ่านลงไปเติมให้กับชั้นหินอุ้มน้ำโดยตรง เป็นน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการไปเติมให้กับความชื้นในดิน และกระบวนการคายระเหยน้ำของพืช แล้วซึมผ่านลงไปเติมโดยตรง

(2) น้ำที่ซึมลงไปเติมทางอ้อม (Indirect Recharge)

น้ำที่ซึมลงไปเติมทางอ้อม (Indirect Recharge) หมายถึง น้ำที่ซึมผ่านท้องน้ำของแม่น้ำ ลำธาร คู คลองต่าง ๆ ลงไปสู่ชั้นหินอุ้มน้ำ

(3) น้ำที่ซึมลงไปเติมเฉพาะแห่ง (Localized Recharge)

น้ำที่ซึมลงไปเติมเฉพาะแห่ง (Localized Recharge) หมายถึง น้ำที่ซึมผ่านลงไปเติมให้กับชั้นหินอุ้มน้ำ โดยเป็นน้ำที่เคลื่อนตัวในแนวระนาบในช่วงแรก และเมื่อมีช่องหรือแนวแตกที่สามารถไหลลงตามแนวตั้งได้สะดวก ก็จะไหลซึมลงไปเติมสู่ชั้นหินอุ้มน้ำ



ภาพที่ 1-5 ประเภทของน้ำที่ลงไปเติมให้กับน้ำใต้ดิน
ที่มา : Lerner et al. (1990)

1.7.2 เทคนิคในการประเมินการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge Estimation Techniques)

สำหรับเทคนิคในการประเมินการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge Estimation Techniques) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มวิธี (Lee et al., 2006; Patel et al., 2011; Rushton et al., 1979; Saghravani et al., 2013)

1.7.2.1 วิธีวัดการเติมน้ำใต้ดินโดยตรง (Direct Measurement)

การวัดการเติมน้ำใต้ดินโดยตรงสามารถทำได้โดยใช้ไลซิมิเตอร์ (Lysimeter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประกอบด้วยถังที่มีดินอยู่ด้านใน ซึ่งสามารถตรวจสอบน้ำหนักและวัดการไหลเข้าออกของน้ำได้ ทำให้สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่กักเก็บอยู่ด้านในได้ด้วยการตรวจสอบน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป เทคนิคนี้เดิมทีมีไว้เพื่อวัดการระเหยในธรรมชาติ อย่างไรก็ตามยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดการเติมน้ำใต้ดินได้ แต่ไม่เหมาะกับการวัดในพื้นที่มีขอบเขตกว้างได้

1.7.2.2 วิธีสมดุลน้ำ (Water Balance Methods)

วิธีสมดุลน้ำประยุกต์สมการสมดุลน้ำในวัฏจักรน้ำมาช่วยในการหาการเติมน้ำใต้ดินดังแสดงในสมการ

$$P = ET + q_s + q_b + q_n + \Delta S \quad \text{-----}(1-2)$$

- เมื่อ
- P = ปริมาณหยาดน้ำฟ้า (Depth/Time)
 - ET = ปริมาณการคายระเหยน้ำของพืช (Depth/Time)
 - q_s = อัตราการไหลของน้ำผิวดิน (Depth/Time)
 - q_b = อัตราการไหลของน้ำใต้ดินสู่น้ำผิวดิน (Depth/Time)
 - q_n = ปริมาณสุทธิของน้ำที่ไหลเข้าหรือออกจากพื้นที่นอกเหนือจากหยาดน้ำฟ้า (Depth/Time)
 - ΔS = ปริมาณกักเก็บที่เปลี่ยนแปลงไป (Depth/Time)

ในธรรมชาติปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชนับเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินมากที่สุด ($\approx 70\%$) ในการวิเคราะห์สามารถไม่สนใจปริมาณสุทธิของน้ำที่ไหลเข้าหรือออกจากพื้นที่นอกเหนือจากหยาดน้ำฟ้า (q_n) และปริมาณกักเก็บที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔS) ได้ เนื่องจากมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนกับตัวแปรอื่นๆ จึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$P - ET = q_s + q_b \quad \text{-----}(1-3)$$

จากสมการความแตกต่างระหว่างปริมาณหยาดน้ำฟ้า (P) และปริมาณการคายระเหยน้ำของพืช (ET) ปรากฏอยู่ในรูปของอัตราการไหลของน้ำผิวดิน (q_s) และอัตราการไหลของน้ำใต้ดินสู่น้ำผิวดิน

ดิน (q_b) ซึ่งอัตราการไหลของน้ำใต้ดินสู่ผิวดิน (q_b) เกิดจากการซึมของน้ำผ่านชั้นดินและไหลออกสู่ลำน้ำเปิดจึงประเมินได้ว่ามีความใกล้เคียงกับอัตราการเติมน้ำใต้ดิน

$$q_b \approx R \quad \text{-----}(1-4)$$

เมื่อ R = อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (Depth/Time)

1.7.2.3 แบบจำลองทางอุทกวิทยา (Hydrological Models)

แบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge Model) จัดอยู่ในกลุ่มของแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์อัตราการเติมน้ำใต้ดิน ปัจจุบันแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินที่ได้รับความนิยมมีดังนี้

■ แบบจำลองดิน-น้ำ-ภูมิอากาศ-พืช (Soil-Water-Atmosphere-Plant Model, SWAP)

แบบจำลองดิน-น้ำ-ภูมิอากาศ-พืช หรือ SWAP เป็นจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำ สารละลาย และความร้อนในชั้นดินไม่อิ่มตัวหรือชั้นดินอิ่มตัว ซึ่งแบบจำลองนี้ออกแบบมาเพื่อให้สามารถจำลองสภาพการไหล และกระบวนการเคลื่อนตัวของน้ำในพื้นที่เพาะปลูกในช่วงฤดูการเจริญเติบโตของพืชและในระยะยาวได้ SWAP เป็นแบบจำลองอนุพันธ์เชิงเลข 1 มิติ ซึ่งอธิบายการไหลของน้ำในชั้นดินไม่อิ่มตัวหรืออิ่มตัวบางส่วนที่ขึ้นกับสมการของ Richard (Gegreyhannes, 2008) มีขอบเขตบนของการจำลองอยู่ที่ผิวดินโดยไม่สนใจสภาพภูมิอากาศและพืชที่ผิวดิน ขอบเขตด้านข้างมีปฏิสัมพันธ์กับน้ำผิวดิน และขอบเขตด้านล่างจะอยู่ที่ชั้นดินอิ่มตัวหรือบนระบบน้ำใต้ดิน ในการจำลองจะจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำในแนวตั้งในชั้นดินไม่อิ่มตัว และหลักการสูญเสียในดินจากการดักน้ำของพืช การระเหย และการคายน้ำจากข้อมูลที่น่าเข้า จากนั้นหาการเปลี่ยนแปลงของการกักเก็บน้ำในดิน และการเติมน้ำใต้ดิน ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองจะประกอบด้วย ปริมาณการระเหยจริง (E_a) ปริมาณการคายน้ำจริง T_a ปริมาณการไหลของน้ำผ่านชั้นดิน และการกระจายตัวของความชื้นในดิน โดยแบบจำลองจะทำการคำนวณอัตราการคายน้ำที่อาจจะเกิดขึ้น (T_p) จากสภาพภูมิอากาศ อัตราการดึงน้ำไปใช้ของรากพืชที่อาจจะเกิดขึ้น $S_p(z)$ ซึ่งหาจากความหนาแน่นของชั้นรากพืชโดยอาศัยสมการของ Feddes et al. ในปี ค.ศ.1978 (Gegreyhannes, 2008)

$$S_p = T_p/D_{\text{root}} \quad \text{-----}(1-5)$$

เมื่อ D_{root} = ความหนาแน่นราก

อีกทั้ง SWAP ยังคำนึงถึงน้ำและความเข้มข้นของเกลือ ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการต่อไปนี้

$$S_a(z) = \alpha_{rw} \alpha_{rs} S_p(z) \quad \text{-----}(1-6)$$

เมื่อ $S_a(z)$ = อัตราการดึงน้ำไปใช้จริงของพืช
 α_{rw}, α_{rs} = Dimensionless Reduction Factor เนื่องจากน้ำและความชื้นเกลือ

อัตราการคายน้ำจริง T_a สามารถหาได้จากการผสมเข้ากับ $S_a(z)$ ในสมการ

SWAP สามารถแยกการระเหยของน้ำในดินและการคายน้ำที่อาจเกิดขึ้น สำหรับบางส่วนที่คลุมหน้าดินโดยใช้ Leaf Area Index (LAI) หรือ Soil Cover Fraction (SCF) ซึ่งการระเหยของน้ำในดินอาจเกิดขึ้นภายใต้พืชคลุมดิน สามารถประมาณการระเหยที่อาจเกิดขึ้นได้จากสมการ Goudriaan ในปี ค.ศ.1997 และสมการของ Belmans ในปี ค.ศ.1983 (Gegreyohannes, 2008)

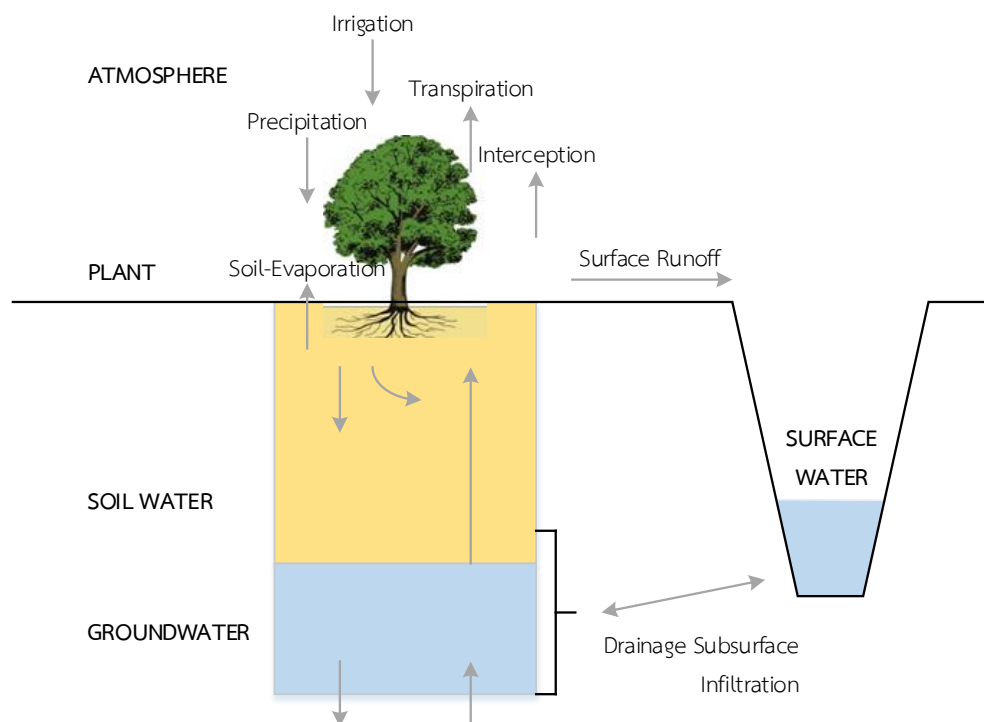
$$E_p = ET_p e^{-k_{gr} LAI} \quad \text{-----}(1-7)$$

เมื่อ E_p = อัตราการการระเหยน้ำในดินที่อาจเกิดขึ้น
 ET_p = อัตราการการระเหยคายน้ำที่อาจเกิดขึ้น
 k_{gr} = Extinction Coefficient สำหรับแสงอาทิตย์
 LAI = Leaf Area Index

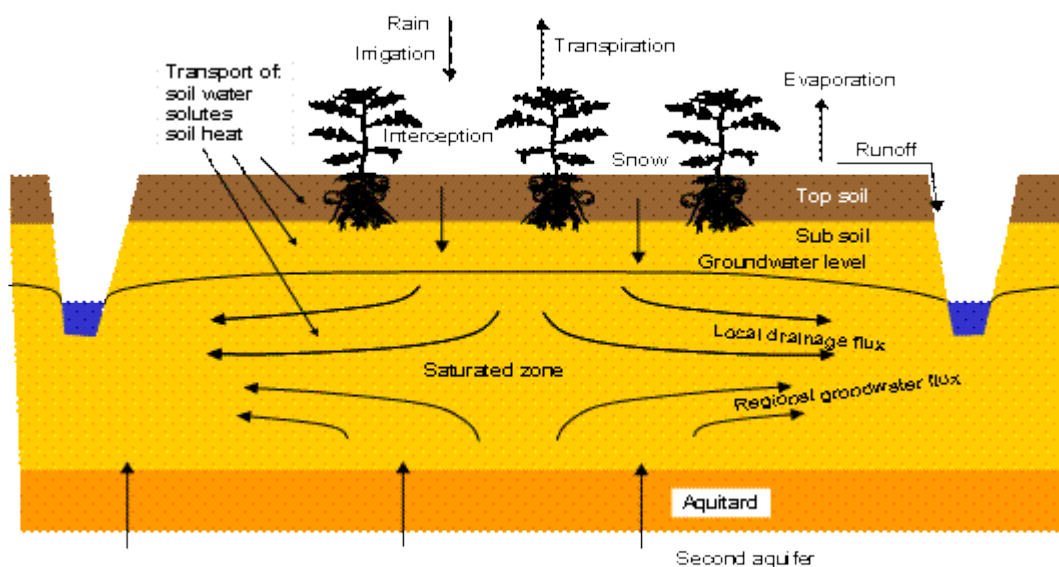
ในกรณีที่ไม่มีทราบ LAI สามารถใช้ Soil Cover Fraction (SCF) เพื่อหา E_p ได้

$$E_p = (1-SCF)ET_p \quad \text{-----}(1-8)$$

SWAP จะใช้ LAI หรือ SCF เพื่อประมาณค่าการระเหย (E_p) ที่อาจเกิดขึ้น จากนั้นโมเดลโปรแกรมจะคำนวณหาอัตราการคายน้ำจริง (E_a) โดยใช้สูตรที่ ซึ่งค่าการระเหยคายน้ำที่ได้จะเกิดจากการนำเข้าค่าการระเหยต่ำสุด



ภาพที่ 1-6 แบบจำลอง SWAP
ที่มา : <http://www.swap.alterra.nl/>

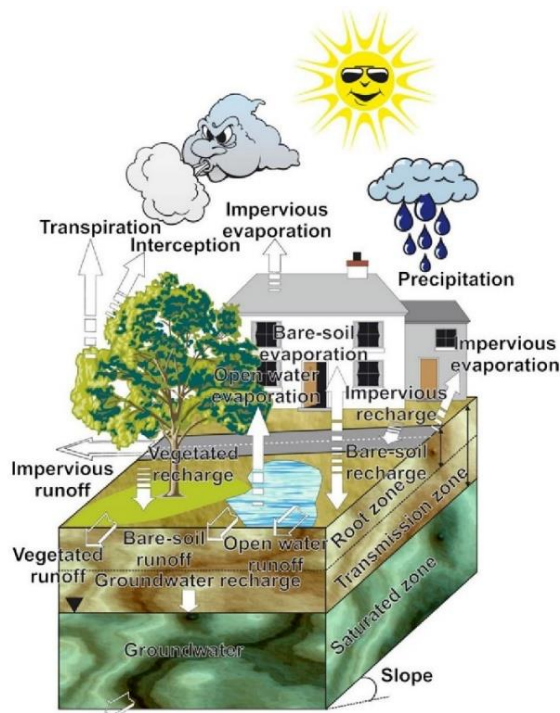


ภาพที่ 1-7 โดเมนแบบจำลอง SWAP และกระบวนการเคลื่อนตัวของน้ำในดิน
ที่มา : <http://www.swap.alterra.nl/>

■ แบบจำลอง WETSPASS (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under Quasi Steady State)

แบบจำลอง WETSPASS (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under Quasi Steady State) เป็นแบบจำลองสมดุลของน้ำที่กระจายตัวตามพื้นที่ภายใต้สภาวะการไหลแบบสม่ำเสมอ (Steady State Spatially Distributed Water Balance Model) ที่รวมเอาหลักการสมดุลของน้ำและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เข้าไว้ด้วยกันเพื่อจำลองการเติมน้ำใต้ดินเฉลี่ยรายปีหรือตามฤดูกาล จำลองการระเหยคายน้ำ จำลองการไหลของน้ำผิวดิน และการกักน้ำของพืช ซึ่งการเติมน้ำใต้ดินจาก WETSPASS สามารถใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลอง MODFLOW ในการจำลองสถานะน้ำใต้ดินเพื่อหาระดับน้ำใต้ดินได้ อีกทั้งระดับน้ำใต้ดินที่ได้จาก MODFLOW ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของ WETSPASS เพื่อทำการปรับแก้ค่าการประมาณการเติมน้ำใต้ดินได้ โดยที่กระบวนการนี้จะทำวนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพึงพอใจ

แบบจำลอง WETSPASS จะถือว่าลุ่มน้ำหรือพื้นที่ศึกษาว่าเป็นราสเตอร์แบบปกติ ทุก ๆ พิกเซลจะถูกแบ่งออกตามลักษณะพื้นผิวเป็น (1) พื้นที่ที่มีพืชคลุมดิน (2) พื้นที่ดินว่างเปล่า (3) พื้นที่ผิวน้ำ และ (4) พื้นที่ที่บ้น้ำ ซึ่งการพิจารณาความแตกต่างของพื้นที่ย่อยจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของราสเตอร์ โดยส่วนของพื้นดินว่างเปล่าของพิกเซลถูกใช้เพื่ออธิบายส่วนที่พื้นผิวไม่ได้ถูกปกคลุมด้วยพืชอย่างเต็มที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูที่พืชยังเติบโตไม่เต็มที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นดินว่างเปล่าจึงเพิ่มขึ้น กระบวนการในการจำลองจะอาศัยหลักสมดุลของน้ำโดยขึ้นกับสมดุลของหยาดน้ำฟ้า การดักน้ำของพืช น้ำผิวดิน การระเหยคายน้ำ และการเติมน้ำใต้ดินในพื้นที่ดังแสดงในภาพที่ 1-8



ภาพที่ 1-8 สมดุลน้ำของภายในแต่ละพิกเซลของราสเตอร์
ที่มา : Batelaan & Smedt (2007)

(1) การจำลองหาการเติมน้ำใต้ดินสำหรับพื้นที่ที่มีพืชคลุมดิน
 การจำลองหาการเติมน้ำใต้ดินสำหรับพื้นที่ที่มีพืชคลุมดินอาศัยสมการที่มีพื้นฐานมาจาก
 หลักการสมดุลของน้ำดังนี้

$$P = I + S_v + T_v + R_v \quad \text{-----}(1-9)$$

โดยที่ P = หยาดน้ำฟ้า
 I = การดักน้ำของพืช
 S_v = น้ำผิวดิน
 T_v = การคายน้ำจริงของพืช
 R_v = การเติมน้ำใต้ดิน

ซึ่งการคายระเหยของน้ำรวม (ET_{tot}) จะหาจากผลรวมของการคายน้ำของพืช (T_v) การ
 ดักน้ำของพืช (I) และการระเหยของน้ำในหน้าดินว่างเปล่า (E_s) โดยที่การดักน้ำของพืชจะถูกกำหนดให้
 เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช

การจำลองการไหลของน้ำผิวดิน (S_v) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ
 การไหลของน้ำผิวดินที่เป็นไปได้ (S_{v-pot}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$S_{v-pot} = f_1(V, ST, S, D)(P - I) \quad \text{-----}(1-10)$$

โดยที่ f_1 = สัมประสิทธิ์การไหลของน้ำผิวดินขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นผิว (V)
 V = ชนิดของพื้นผิว
 ST = ลักษณะหน้าดิน
 S = ความลาดเอียงของพื้นผิว
 D = พื้นที่น้ำใต้ดินอิ่มตัว

อย่างไรก็ตาม การไหลของน้ำผิวดินที่เป็นไปได้ (S_{v-pot}) ยังเป็นเพียงแค่ทฤษฎีที่เกิดขึ้นใน
 พื้นที่น้ำใต้ดินอิ่มตัว ในขั้นตอนที่ 2 การไหลของน้ำผิวดินที่เป็นไปได้ (S_{v-pot}) จะถูกปรับแก้สำหรับพื้นที่ที่มี
 การเติมน้ำใต้ดินโดยคำนึงถึงการแจกแจงความชื้นฝนตามฤดูกาล (P_i) เมื่อเทียบกับความสามารถในการ
 ซึมผ่านของดิน (I_c)

$$S_v = f_2(P_i, I_c, D)S_{v-pot} \quad \text{-----}(1-11)$$

โดยที่ f_2 = สัมประสิทธิ์จากลักษณะหน้าดิน ซึ่งประมาณได้จากปริมาณฝนและความ
 เข้มข้นที่มากกว่าการซึมของดินชนิดนั้น ๆ ในแต่ละฤดู

การคายระเหยน้ำจะถูกจำลองโดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศจากสมการดังต่อไปนี้

$$T_{rv} = cE_0 \quad \text{-----}(1-12)$$

โดยที่ T_{rv} = การคายน้ำของพืชอ้างอิงในพื้นที่ที่มีพืชคลุมดิน
 E_0 = การระเหยของน้ำในแหล่งน้ำ
 c = สัมประสิทธิ์ของพื้นที่ที่มีพืชคลุมดินซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วน
 ระหว่างการคายน้ำของพืชอ้างอิง และการระเหยของน้ำในแหล่งน้ำที่ได้
 จากสมการของ Penman-Monteith

$$c = \frac{1 + \frac{\gamma}{\Delta}}{1 + \frac{\gamma}{\Delta} (1 + r_c/r_a)} \quad \text{-----}(1-13)$$

โดยที่ γ = ความถ่วงจำเพาะของน้ำ (ค่าคงที่)
 Δ = สัดส่วนคงที่ หรือความลาดเอียงของเส้นความดันไอน้ำอิ่มตัว
 r_a = ค่าความต้านทานทางอากาศพลศาสตร์
 r_c = ค่าความต้านทานของการปกคลุม

ในพื้นที่ที่มีการเติมน้ำใต้ดินและมีพืชคลุมดินนั้นค่าการคายน้ำจริงของพืช (T_v) จะเท่ากับการคายน้ำของพืชอ้างอิงเนื่องจากการจำกัดความชื้นในดิน ภายใต้พื้นที่ที่มีพืชคลุมดินที่ซึ่งระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าชั้นรากพืชการหาการคายน้ำจริงของพืช (T_v) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$T_v = f(\theta) T_{rv} \quad \text{ถ้า } G_d > R_d + h_t \quad \text{-----}(1-14)$$

โดยที่ $f(\theta)$ = ฟังก์ชันของความชื้นในดิน (θ) ในชั้นรากพืช
 G_d = ระดับน้ำใต้ดิน
 h_t = ระดับอิ่มตัวของน้ำใต้ดิน
 R_d = ระดับของชั้นรากพืช

ซึ่งฟังก์ชันของความชื้นในดินในชั้นรากพืช $f(\theta)$ จะใช้สมการที่มีพื้นฐานมาจาก Vandewiele (1991) และ Xu (1992) ดังต่อไปนี้

$$f(\theta) = 1 - a^{w/T_{rv}} \quad \text{-----}(1-15)$$

โดยที่ a = พารามิเตอร์ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะของผิวดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลง
 ของ Hydraulic Conductivity
 w = ปริมาณสำหรับการคายน้ำ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$w = P + n (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) R_d \quad \text{-----}(1-16)$$

โดยที่ P = ปริมาณฝนในฤดูนั้นทั้งสิ้น n เดือน

$$\begin{aligned}\theta_{fc} &= \text{ความชื้นในชั้นรากพืชที่จุดแห้งถาวร} \\ \theta_{pwp} &= \text{ความชื้นในชั้นรากพืชที่ความจุสนาม} \\ (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) &= \text{ความชื้นในดินสำหรับพืช}\end{aligned}$$

การจำแนกดินของแบบจำลอง WETSPASS จะอ้างอิงจากการจำแนกดินของ US Department of Agriculture, Soil Survey Staff ในปี ค.ศ. 1951 และการเปลี่ยนแปลงการกักเก็บน้ำ ถูกนำมาใช้ในรูปแบบที่กำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกันในฤดูหนาวและฤดูร้อน โดยสมมุติว่าในช่วงฤดูหนาวมีการกักเก็บน้ำสำหรับพืชเต็มช่องว่างในดิน ดังนั้น ในช่วงฤดูร้อนน้ำที่กักเก็บไว้จะถูกใช้และหมดลง

(2) การจำลองหาการเติมน้ำใต้ดินสำหรับพื้นที่ที่เป็นดินว่างเปล่า

การจำลองหาการเติมน้ำใต้ดินสำหรับพื้นที่ที่เป็นดินว่างเปล่าสามารถทำได้โดยใช้หลักการเดียวกับในพื้นที่ที่มีพืชคลุมดิน แต่การเติมน้ำใต้ดินจะพิจารณาจากหลักสมดุลของน้ำสำหรับพื้นที่เป็นดินว่างเปล่าดังสมการต่อไปนี้

$$P = S_s + E_s + R_s \quad \text{-----}(1-17)$$

โดยที่พารามิเตอร์ที่ห้อยด้วย “s” นั้นจะหมายถึงสำหรับใช้ในพื้นที่ที่เป็นดินว่างเปล่าซึ่งทำให้พารามิเตอร์บางตัวใช้สมการที่แตกต่างไปจากในพื้นที่ที่มีพืชคลุมดิน เช่น การหาการระเหยของน้ำ (E_s)

$$E_s = f(\theta) E_0 \quad \text{-----}(1-18)$$

โดยที่สมการนี้จะใช้ลักษณะเดียวกับสมการสำหรับพื้นที่ที่มีพืชคลุมดิน แต่จะแทนที่การคายน้ำของพืชอ้างอิง (T_{rv}) ด้วยการระเหยของน้ำจากดิน (E_{ps}) ในสมการของ Penman

(3) การจำลองหาการเติมน้ำใต้ดินสำหรับพื้นที่ที่เป็นแหล่งน้ำ

การจำลองหาการเติมน้ำใต้ดินสำหรับพื้นที่ที่เป็นแหล่งน้ำจะใช้สมการสมดุลของน้ำเดียวกัน

$$P = S_o + E_o + R_o \quad \text{-----}(1-19)$$

โดยที่พารามิเตอร์ที่ห้อยด้วย “o” นั้นจะหมายถึงพื้นที่ที่เป็นแหล่งน้ำ โดยการเติมน้ำใต้ดิน (R_o) จะหาได้จากปริมาณฝนที่ตกลงบนพื้นที่นี้ เมื่อเทียบกับการเติมน้ำใต้ดินจากการซึมของน้ำภายในแหล่งน้ำ และถ้าการระเหยของน้ำ (E_o) น้อยกว่าปริมาณฝน ค่าส่วนต่างนั้นจะเป็นน้ำผิวดิน (S_o)

(4) การจำลองหาการเติมน้ำใต้ดินสำหรับพื้นที่ที่บ้น้ำ

การจำลองหาการเติมน้ำใต้ดินสำหรับพื้นที่ที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้จะใช้สมการสมดุลของน้ำเดียวกัน

$$P = S_i + E_i + R_i \quad \text{-----}(1-20)$$

โดยที่พารามิเตอร์ที่ห้อยด้วย “i” นั้นจะหมายถึงสำหรับพื้นที่ที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้เนื่องจากพื้นผิวประเภทนี้มีอยู่หลายลักษณะจึงจำเป็นต้องระบุรายละเอียดหรือค่าสัมประสิทธิ์การไหลและการระเหยของน้ำจากพื้นผิวโดยอาศัยความรู้และการสังเกตลักษณะของพื้นผิวเหล่านั้น

และในขั้นสุดท้ายผลรวมทั้งหมดจากพื้นที่แต่ละรูปแบบจะถูกรวมไว้ด้วยกันภายใต้สมการต่อไปนี้

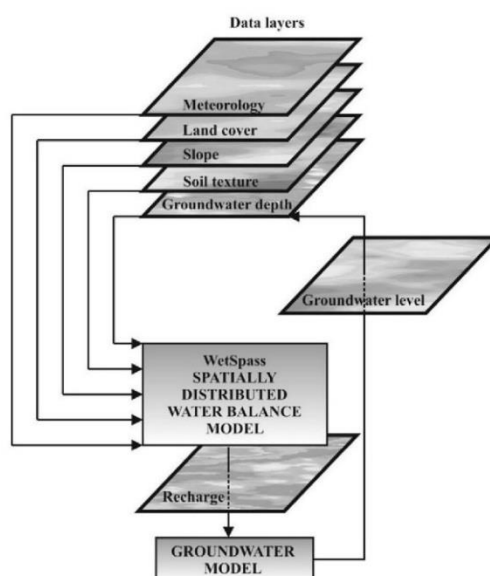
$$ET_c = a_v ET_v + a_s E_s + a_o E_o + a_i E_i \quad \text{-----}(1-21)$$

$$S_c = a_v S_v + a_s S_s + a_o S_o + a_i S_i \quad \text{-----}(1-22)$$

$$R_c = a_v R_v + a_s R_s + a_i R_i \quad \text{-----}(1-23)$$

โดยที่พารามิเตอร์ที่ห้อยด้วย “c” นั้นจะหมายถึงภายในแต่ละพิกเซลของราสเตอร์

ผลจากการหาการกระจายตัวของการเติมน้ำใต้ดินนี้สามารถนำไปใช้ในแบบจำลองน้ำใต้ดิน และสามารถนำระดับน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลองน้ำใต้ดินมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของ WETSPASS ได้ตามภาพที่ 1-9



ภาพที่ 1-9 แผนผังของกระบวนการทำงานระหว่าง WETSPASS กับแบบจำลองน้ำใต้ดิน
ที่มา : Batelaan & Smedt (2007)

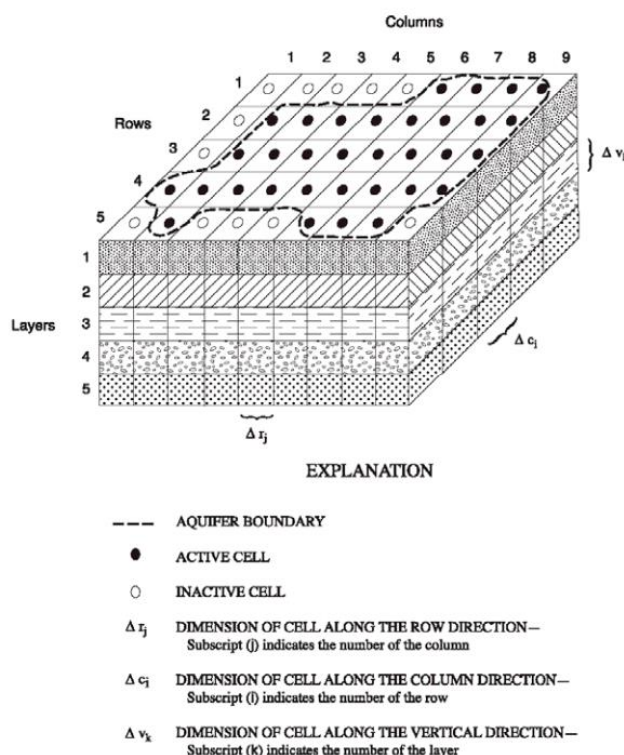
■ แบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน (Model of Groundwater Flow, MODFLOW)

แบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน MODFLOW เป็นแบบจำลองแบบ 3 มิติที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำแบบจำลองน้ำใต้ดินโดยสามารถจำลองการไหลแบบคงที่ (Steady Flow) และการไหลแบบไม่คงที่ (Non-Steady Flow) สำหรับการไหลในรูปร่างต่าง ๆ ได้ อีกทั้งยังสามารถจำลองการไหลในชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดันหรือหินอุ้มน้ำมีแรงดันและรวมถึงไหลภายนอก เช่น การไหลของน้ำจากบ่อน้ำลงสู่ใต้ดิน เป็นต้น และสามารถแยกจำลองค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสำหรับชั้นดินที่แตกต่างกันได้ โดยการไหลของน้ำใต้ดินแบบ 3 มิติที่ความหนาแน่นคงที่ผ่านรูพรุนของชั้นดินสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial-differential equation) (Harbaugh et al., 2000) ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \text{-----(1-24)}$$

เมื่อ K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} = ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแกน x, y และ z
 h = ค่าโพเทนชิโอเมตริกเฮด (Potentiometric Head)
 W = ปริมาตรการไหล (Volumetric Flux) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของแหล่งน้ำ
 $W < 0.0$ สำหรับการไหลของน้ำออกจากระบบน้ำใต้ดิน และ $W > 0.0$
 สำหรับการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบน้ำใต้ดิน
 S_s = ค่าการกักเก็บจำเพาะ (Specific storage) ของวัสดุพูน
 t = เวลา

แบบจำลอง MODFLOW อาศัยวิธี Finite-Difference ในการแก้สมการการไหลของน้ำใต้ดิน โดยแบ่งบริเวณที่มีการไหลปรากฏด้วยกริด (Grid) ทั้ง 3 แกน เป็นบล็อกต่าง ๆ เรียกว่า เซลล์ (Cell) และสามารถวิเคราะห์อัตราการไหลเข้าหรืออัตราการไหลออกของแต่ละเซลล์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้



ภาพที่ 1-10 การจำลองระบบชั้นหินอุ้มน้ำของแบบจำลอง MODFLOW
ที่มา : Harbaugh and Geological Survey (2005)

1.7.2.4 วิธี Tracer (Tracer Methods)

วิธี Tracer เป็นวิธีที่ใช้ในการวัดการปริมาณสารละลายที่แพร่ลงสู่ดินทำให้เกิดการปนเปื้อน แต่สามารถประยุกต์เพื่อประมาณการเติมน้ำใต้ดินได้โดยอาศัยสมการพื้นฐานที่เรียกว่า Peak Method (Wu et al., 2016)

$$R = v \times \theta = \Delta Z / \Delta t \times \theta \quad \text{-----}(1-25)$$

เมื่อ R = อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (Depth/Time)
 v = ความเร็วในการซึมของน้ำในดินในแนวดิ่ง (Depth/Time)
 ΔZ = ความลึกของ Tracer peak (Depth)
 Δt = ระยะเวลาระหว่างการใส่ Tracer และการเก็บตัวอย่าง (Time)
 θ = ค่าเฉลี่ยความชื้นในดินภายในช่วง ΔZ ระหว่าง Δt

ความแม่นยำของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของเวลาในการเก็บตัวอย่าง หากช่วงระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างต่างกัน อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้ก็แตกต่างกันแม้จะเก็บมาจากพื้นที่เดียวกัน และหากพื้นที่นั้นมีรูปแบบการวางตัวของชั้นดินที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อช่องว่างในดิน จึงจำเป็นต้องทำการหาการเติมน้ำใต้ดินตามลักษณะของช่องว่างที่ต่างกัน โดยแบ่งออกเป็นหลาย ๆ โซน

$$R = \sum R_i = \sum (S_i/S) R_i \quad ; i \text{ จนถึง } N \text{ บน Tracing Face} \quad \text{---(1-26)}$$

$$R = \sum \alpha_i \times \theta_i \times \Delta Z_i / \Delta t \quad ; i \text{ จนถึง } N \text{ ภายในหน้าตัด} \quad \text{---(1-27)}$$

$$\alpha_i = (\Delta Z_i \times c_i) / (\sum \Delta Z_i \times c_i) \quad ; i \text{ จนถึง } N \quad \text{-----(1-28)}$$

เมื่อ R = อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (Depth/Time)
 N = จำนวนโซน
 S_i = พื้นที่ของแต่ละโซน
 S = พื้นที่ทั้งหมด
 α_i = ร้อยละของ Tracer' mass ในหน้าดิน
 ΔZ_i = ระยะทางการลำเลียงน้ำผ่านโซน (L)
 ΔZ_i = ระยะของแต่ละช่วงภายในโซน (L)
 c_i = ความเข้มข้นของ Tracer เฉลี่ยในหน้าตัดดิน
 θ_i = ความชื้นในดินเฉลี่ยภายใต้ความลึก ΔZ_i

1.7.2.5 วิธีเอมไพริคัล (Empirical Method)

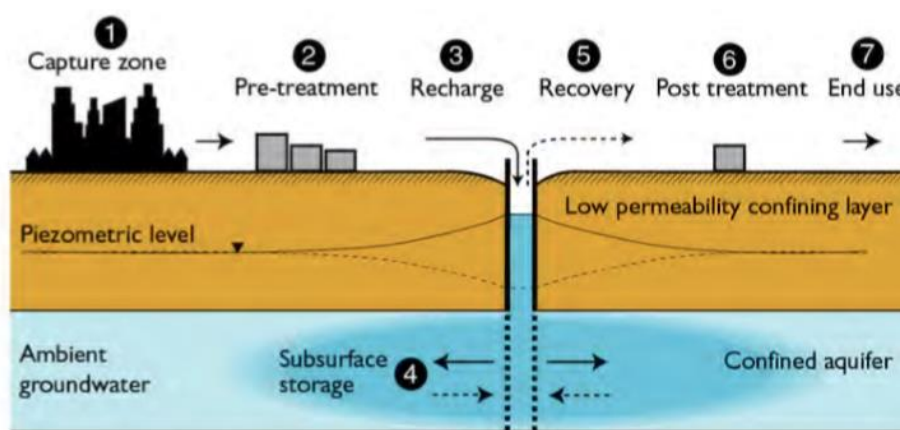
การคำนวณหาการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้วิธีเอมไพริคัลสามารถประมาณการเติมน้ำใต้ดินจากปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่ได้ เช่น สมการของ Chaturvedi ซึ่งพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1973 (Saghravani et al., 2013) สมการของ Sehgal ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1973 (Sehgal, 1973) สมการของ Krishna Rao ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1970 (Krishna, 1970) และสมการของ Bhattacharya ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1954 (Bhattacharya et al., 1954) แต่วิธีเหล่านี้เป็นเพียงการประมาณการเติมน้ำใต้ดินจากปริมาณฝนในพื้นที่เท่านั้น จำเป็นอาศัยกระบวนการวิเคราะห์อื่น ๆ เข้ามาช่วยให้ค่ามีความแม่นยำใกล้เคียงกับสภาพจริงมากยิ่งขึ้น

1.7.3 การจัดการการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (Managed Aquifer Recharge, MAR)

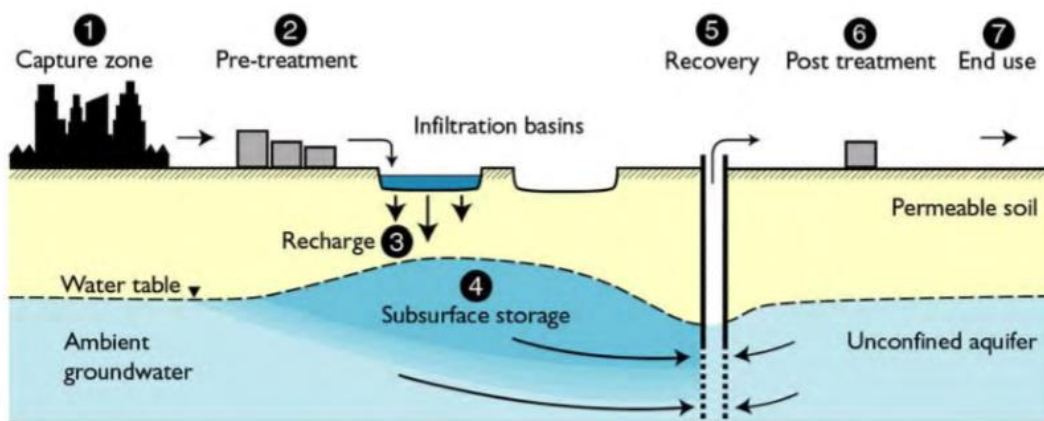
การจัดการการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (Managed Aquifer Recharge, MAR) มีเป้าหมายหลักเพื่อฟื้นฟูและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เช่น การรักษาระดับน้ำใต้ดิน หรือป้องกันการรุกคืบของน้ำเค็ม โดยทำการเติมน้ำลงสู่ชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน ซึ่งปกติการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นหินอุ้มน้ำมีกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น น้ำฝนที่ซึมผ่านชั้นดินสู่ชั้นน้ำใต้ดิน หรือการไหลของน้ำท่าใต้ดิน เป็นต้น โดยแหล่งน้ำที่นำมาเติมน้ำลงสู่ชั้นหินอุ้มน้ำสามารถนำมาได้จากหลากหลายแหล่งที่มา เช่น น้ำฝน น้ำจากชั้นหินอุ้มน้ำอื่น น้ำจากการชลประทาน หรือน้ำที่ได้รับการบำบัดจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น การจัดการการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินมีการนำไปใช้เพื่อเพิ่มปริมาณแหล่งน้ำในหลายพื้นที่โดยเฉพาะพื้นที่ที่แห้งแล้ง หรือค่อนข้างแห้งแล้ง แม้กระทั่งในพื้นที่ชื้นด้วยเช่นกันโดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มศักยภาพของแหล่งน้ำใต้ดินทั้งในแง่ปริมาณและคุณภาพ

1.7.4 ประเภทของการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (Types of Managed Aquifer Recharge)

การเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักโดยแบ่งตามลักษณะของชั้นหินอุ้มน้ำในพื้นที่ของโครงการ ได้แก่ ชั้นหินอุ้มน้ำแบบมีแรงดันซึ่งมีความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านชั้นหิน (Permeability) ต่ำ เหมาะสำหรับวิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลโดยใช้บ่อเติมน้ำดังภาพที่ 1-11(a) และ ชั้นหินอุ้มน้ำแบบไร้แรงดันซึ่งมีความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านชั้นหินสูงกว่า เหมาะสำหรับวิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลโดยใช้สระเติมน้ำดังภาพที่ 1-11(b)



(a)



(b)

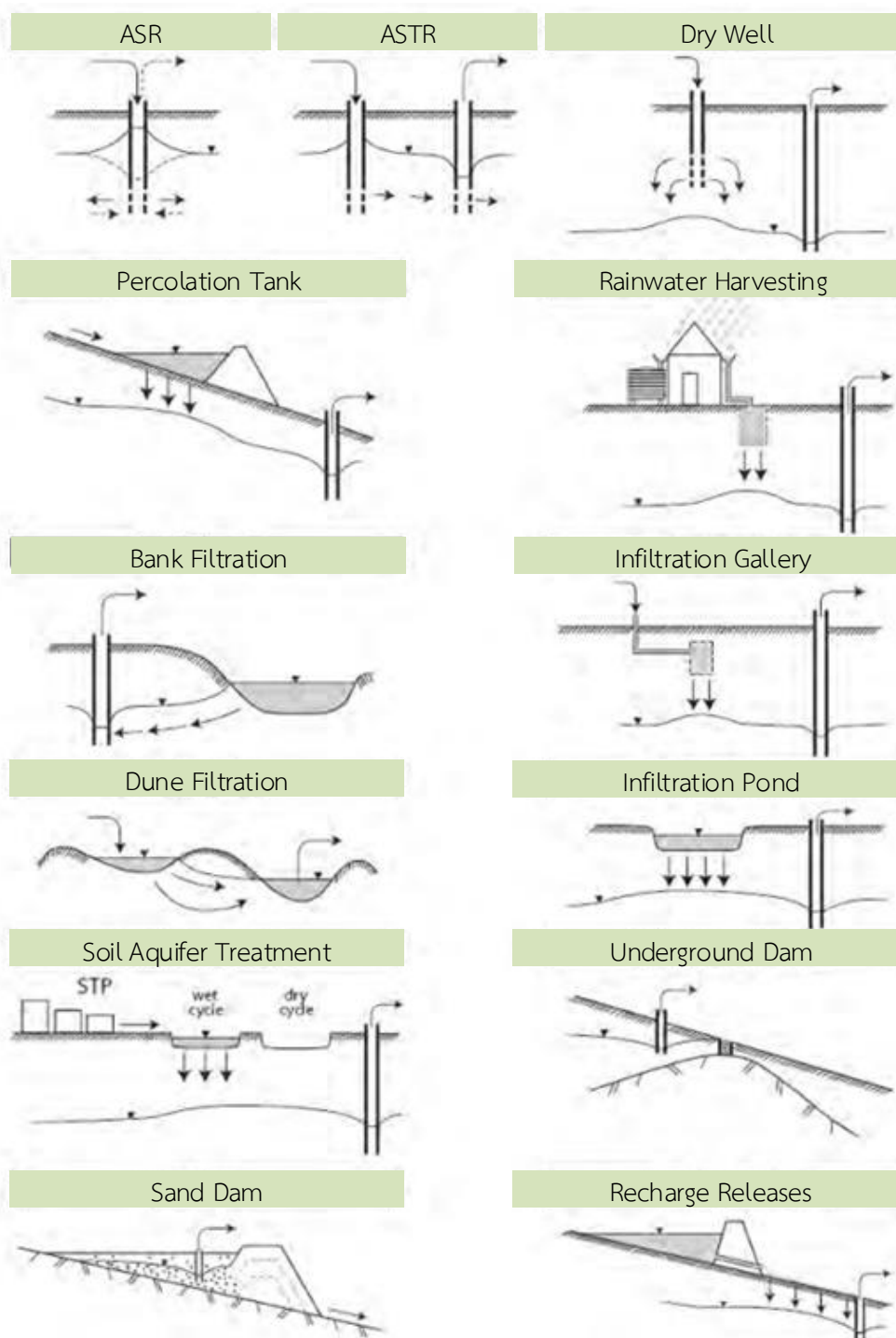
ภาพที่ 1-11 ประเภทของการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

วิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินมีหลากหลายดังแสดงในภาพที่ 1-12 ได้แก่

- (1) การเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลระดับลึกเพื่อกักเก็บและสูบกลับมาใช้ (Aquifer Storage and Recovery, ASR และ Aquifer Storage, Transfer and Recovery, ASTR)
- (2) การเติมน้ำผ่านบ่อแห้ง (Dry Well) มีลักษณะเป็นบ่อดินเหมาะสำหรับการเติมน้ำสู่ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined Aquifer)
- (3) ฝายเติมน้ำ (Percolation Tank) มีลักษณะเป็นเขื่อนกักเก็บน้ำท่าชั่วคราว

- (4) การเก็บเกี่ยวน้ำฝน (Rainwater Harvesting) โดยการสร้างทางน้ำไหลจากหลังคาบ้านสู่บ่อกักเก็บ
- (5) การสูบน้ำจากตะกอนชายฝั่งแม่น้ำ (Bank Filtration) สูบน้ำจากแม่น้ำหรือทะเลสาบบริเวณใกล้เคียงเข้าสู่บ่อบาดาลในพื้นที่
- (6) ระบายเติมน้ำ (Infiltration Gallery) ใช้ระบบท่อน้ำใต้ดินสำหรับการเติมน้ำจากบริเวณเหนือระดับน้ำบาดาลสู่ชั้นน้ำบาดาลที่มีลักษณะชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (Unconfined Aquifer)
- (7) การเติมน้ำผ่านสันทราย (Dune Infiltration) เติมน้ำจากสระสันทรายที่สูงกว่าสู่น้ำในสระที่ต่ำกว่า
- (8) สระเติมน้ำ (Infiltration Pond) รวบรวมน้ำผิวดินสู่อ่างเก็บน้ำจากนั้นปล่อยให้น้ำซึมผ่านสู่ชั้นน้ำบาดาลที่มีลักษณะชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน
- (9) การเติมน้ำและบำบัดผ่านชั้นดินและชั้นหินอุ้มน้ำ (Soil Aquifer Treatment) กำจัดสารอาหาร (Nutrient) และเชื้อโรคในน้ำโดยปล่อยให้น้ำจากการบำบัดซึมผ่านสระเติมน้ำ
- (10) เขื่อนใต้ดิน (Underground Dam)
- (11) เขื่อนทราย (Sand Dam) สร้างเขื่อนดักตะกอน เหมาะสำหรับพื้นที่แห้งแล้งและพื้นที่ที่ความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านชั้นหินต่ำ
- (12) การระบายจากแหล่งกักเก็บ (Recharge Releases)

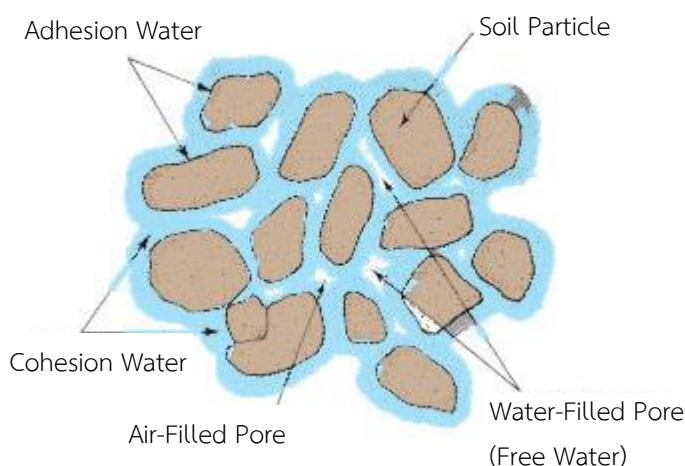
การเลือกใช้วิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของพื้นที่ ลักษณะของชั้นน้ำบาดาล ภูมิประเทศ และปริมาณการใช้น้ำบาดาล



ภาพที่ 1-12 ประเภทของการจัดการเพื่อเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน
ที่มา : Dillon et al. (2009)

1.7.5 ข้อมูลพารามิเตอร์ดินที่สำคัญ (Important Soil Parameters)

ชั้นดินและชั้นหินที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้จะเรียกว่า ตัวกลาง (Porous Media) โดยมีระดับน้ำใต้ดิน (Water Table) เป็นเส้นแบ่งระหว่างตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พิจารณารูปหน้าตัดของตัวกลางที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Porous Medium) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคดินของแข็ง (Solid Particles) และช่องว่าง (Pores/Voids) ที่มีทั้งน้ำและอากาศแทรกซึมอยู่บางส่วนดังภาพที่ 1-13



ภาพที่ 1-13 รูปหน้าตัดของตัวกลางที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
ที่มา : FAO (2019)

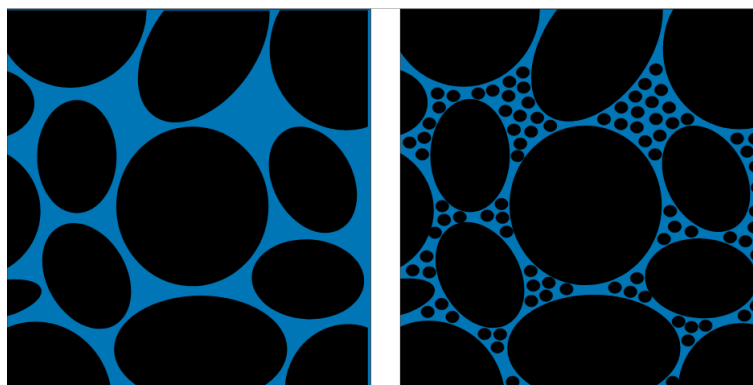
ประสิทธิภาพในการอุ้มน้ำของมวลดินหรือหินว่าจะเป็นชั้นหินอุ้มน้ำที่ดีหรือไม่ สามารถนำน้ำมาใช้ประโยชน์ได้มากน้อยแค่ไหน จะขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยาพื้นฐานของชั้นดินหรือชั้นหินนั้น ๆ

1.7.5.1 ความพรุน (Porosity)

ความพรุน (Porosity, ϕ) คือ ปริมาณช่องว่าง (Pores) ที่สามารถเก็บกักน้ำได้ที่มียู่ในหนึ่งหน่วยปริมาตรของมวลดินหรือหินใด ๆ ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างในมวลดินหรือหินกับปริมาตรรวมของมวลดินหรือหินนั้น โดยปกติค่าความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 หรือแสดงค่าอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์อยู่ระหว่าง 0%-100% หรืออาจกล่าวได้ว่าความพรุนเป็นปริมาณช่องว่างในดินที่มีอยู่ทั้งหมดที่น้ำผิวดินสามารถเข้าไปแทรกอยู่ได้ ดังแสดงในสมการที่ 1-29 และภาพที่ 1-14

$$\phi = \frac{V_V}{V_T} \quad \text{-----(1-29)}$$

เมื่อ V_V = ปริมาตรช่องว่างในดิน (Volume of Void in Soil)
 V_T = ปริมาตรรวมทั้งหมดของดิน (Total Volume of Soil)



ภาพที่ 1-14 ช่องว่างในดิน
ที่มา : Wikipedia (2019a)

โดยทั่วไปแล้วความพรุนของดินมีค่าประมาณ $0.25 < \phi < 0.75$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของเนื้อดิน (Soil Texture) ในแต่ละพื้นที่ ในส่วนของช่องว่างในดินที่มีน้ำและอากาศแทรกซึมอยู่บางส่วนนั้นสามารถวัดได้ในรูปของปริมาณความชื้นในดิน (Soil Moisture Content, θ)

1.7.5.2 อัตราส่วนช่องว่างในดิน (Void Ratio)

อัตราส่วนช่องว่างในดิน (Void Ratio, e) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรช่องว่างในดินต่อปริมาตรของดิน

$$e = \frac{V_V}{V_S} \quad \text{-----}(1-30)$$

เมื่อ V_V = ปริมาตรช่องว่างในดิน (Volume of Void in Soil)

V_S = ปริมาตรดิน (Volume of Solid)

โดยที่ปริมาตรรวมทั้งหมดของดิน (Total Volume of Soil) มีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาตรช่องว่างในดินและปริมาณดินดังแสดงในสมการที่ 1-31

$$V_T = V_V + V_S \quad \text{-----}(1-31)$$

1.7.5.3 ปริมาณความชื้นในดิน (Soil Water Content)

ปริมาณความชื้นในดิน (Soil Moisture Content หรือ Water Content, θ) คำนวณได้ใน 2 ลักษณะ คือ (1) ปริมาณความชื้นในดินโดยน้ำหนัก (Mass Water Content) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำที่อยู่ในมวลดินกับน้ำหนักของเม็ดดิน ดังแสดงในสมการที่ 1-32 และภาพที่ 1-15

และ (2) ปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตร (Volume Water Content) หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง ปริมาตรของน้ำในดินกับปริมาตรทั้งหมดในดิน ดังแสดงในสมการที่ 1-33 และภาพที่ 1-9

$$\theta = \frac{W_W}{W_S} \quad \text{-----}(1-32)$$

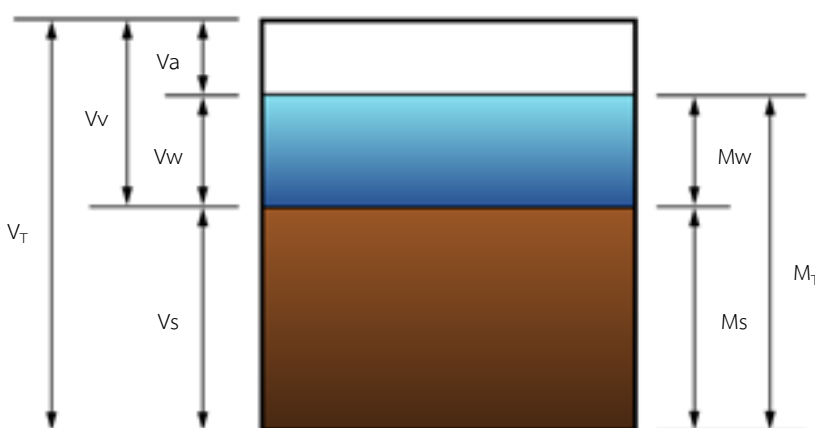
เมื่อ W_W = น้ำหนักของน้ำที่อยู่ในมวลดิน (Weight of Water in Soil)

W_S = น้ำหนักของเม็ดดิน (Weight of Soil)

$$\theta = \frac{V_W}{V_S} \quad \text{-----}(1-33)$$

เมื่อ V_W = ปริมาตรของน้ำในดิน (Volume of Water in Soil)

V_S = ปริมาตรรวมทั้งหมดของมวลดิน (Total Volume of Soil)



ภาพที่ 1-15 ส่วนประกอบของดินจัดแบ่งตามปริมาตรและน้ำหนัก

ที่มา : Wikipedia (2019b)

โดยที่ $0 < \theta < \phi$; และค่าปริมาณความชื้นในดินจะมีค่าเท่ากับความพรุนในสภาพที่ดิน อิ่มตัวด้วยน้ำ

1.7.5.4 ความจุความชื้นภาคสนาม (Field Capacity)

ความจุความชื้นภาคสนาม (Field Capacity, θ_{FC}) คือ ปริมาณความชื้นในดิน (Soil Moisture) หรือปริมาณน้ำหรือความชื้นของดิน (Water Content) ที่ยังคงเหลืออยู่ในดิน เมื่อดินอิ่มตัว ด้วยน้ำแล้ว 2-3 วัน หลังจากฝนตกหรือให้น้ำชลประทานในดิน หรือหลังจากที่ไม่มีการไหลของน้ำด้วย อิทธิพลของแรงโน้มถ่วง (Wikipedia, 2019) สำหรับคำจำกัดความทางกายภาพของความจุความชื้น

ภาคสนามหมายถึง ระดับความชื้นของดินซึ่งระดับศักย์ของน้ำน้อยกว่า -0.33 บาร์ เป็นน้ำที่มากที่สุดที่ดินเก็บไว้ได้ ดังแสดงในภาพที่ 1-16 และภาพที่ 1-17

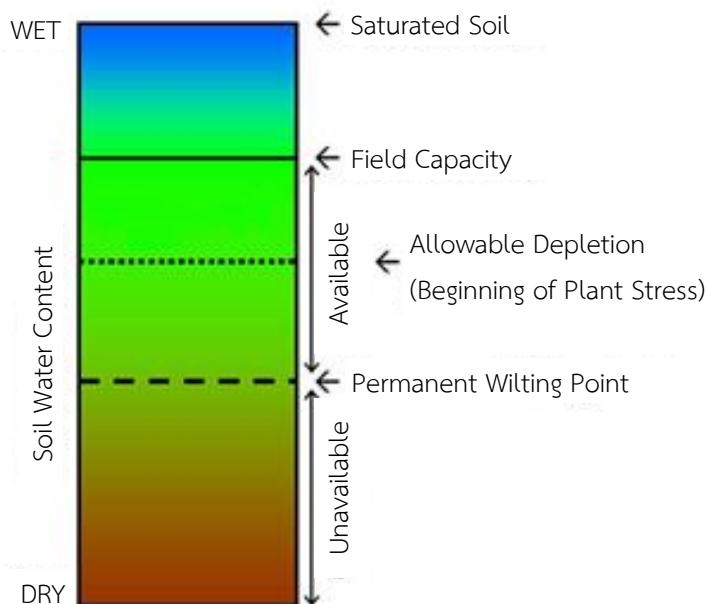
1.7.5.5 จุดเหี่ยวเฉาถาวร (Permanent Wilting Point)

จุดเหี่ยวเฉาถาวร (Permanent Wilting Point, θ_{PWP}) คือ ระดับความชื้นที่พืชเริ่มแสดงอาการเหี่ยวและไม่ฟื้นตัวแม้จะอยู่ในบรรยากาศที่ชื้นจัดเป็นเวลาข้ามคืน เมื่อความชื้นของดินในเขตรากพืชลดลงถึงจุดนี้ จะทำให้พืชเหี่ยวเฉาขาดน้ำตาย เพราะไม่สามารถดูดน้ำมาทดแทนการคายน้ำได้ (Wikipedia, 2019c) หรืออาจกล่าวได้ว่า จุดเหี่ยวเฉาถาวร หมายถึง ความชื้นของดินที่ถูกแรงดึงดูดน้อยกว่า -15 บาร์ น้ำในส่วนนี้พืชดูดไปใช้ได้ยากจนทำให้พืชแสดงอาการเหี่ยว ดังแสดงในภาพที่ 1-10 และภาพที่ 1-11

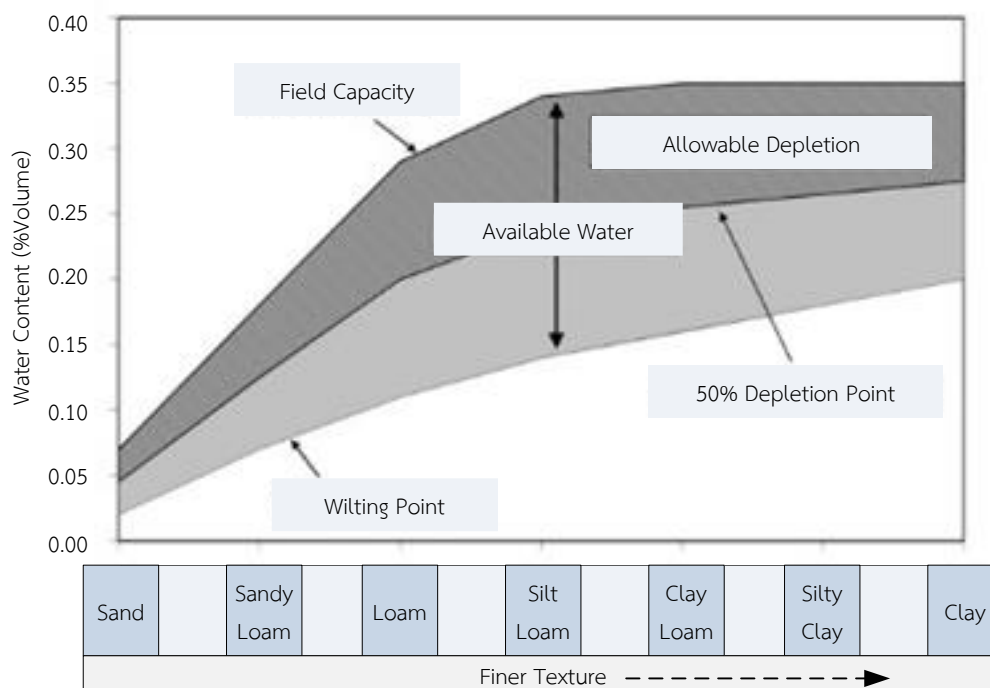
1.7.5.6 ความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ของพืช (Plant Available Water Capacity)

ความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ของพืช (Plant Available Water Capacity, θ_A) คือ ปริมาณน้ำในดินส่วนที่รากพืชสามารถดูดไปใช้ โดยถูกดินดึงดูดไว้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง -0.33 ถึง -15 บาร์ หรือกล่าวได้ว่าความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์เป็นผลต่างของระดับความจุความชื้นสนาม (θ_{FC}) กับจุดเหี่ยวเฉาถาวร (PWP) ดังแสดงสมการที่ 1-34 และภาพที่ 1-16 ถึงภาพที่ 1-17

$$\theta_A = \theta_{FC} - \theta_{PWP} \quad \text{-----(1-34)}$$



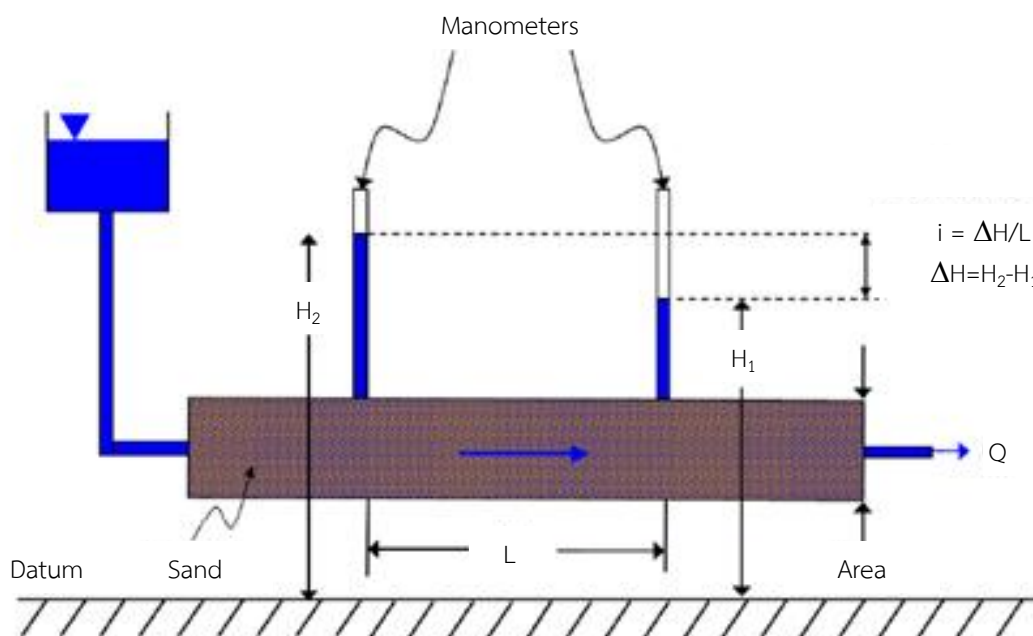
ภาพที่ 1-16 ปริมาณความชื้นในดิน
ที่มา : Utah State University (2019)



ภาพที่ 1-17 ปริมาณความชื้นตามประเภทดิน
ที่มา : Utah State University (2019)

1.7.5.7 กฎของสมการดาร์ซี (Darcy's Law)

Henry Darcy เป็นวิศวกรชาวฝรั่งเศสซึ่งได้ชื่อว่าเป็นบิดาแห่งน้ำใต้ดิน Darcy ได้ทำการทดลองและพัฒนาทฤษฎีของการไหลผ่านตัวกลางที่มีความพรุน เรียกว่า กฎของดาร์ซี (Darcy's Law) ในช่วงกลางปี ค.ศ. 1800 โดยได้ทำการทดลองโดยใช้ทรายเป็นตัวกลางดังแสดงในภาพที่ 1-18 กฎของดาร์ซีนับได้ว่าเป็นสมการพื้นฐานที่ได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางอุทกธรณีวิทยาเพื่ออธิบายการไหลของน้ำผ่านชั้นหินอุ้มน้ำและแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลผ่านของน้ำ (Discharge, Q) นั้นแปรผันตรงกับความลาดชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient, i) และยังขึ้นอยู่กับชนิดดินในชั้นหินอุ้มน้ำนั้น ๆ (Aquifer Material) ดังแสดงในสมการที่ 1-35



ภาพที่ 1-18 การทดลองของดาร์ซี
ที่มา : IDAHO (2019)

$$Q = KiA \quad \text{-----}(1-35)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของน้ำ (Discharge, L^3/T)
 K = ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity, L/T)
 i = ค่าความลาดชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient, L/L)
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวกลาง (Cross Sectional Area, L^2)

1.7.5.8 ความซาบซึมน้ำ (Permeability)

ความซาบซึมน้ำ (Permeability) หมายถึง ความสามารถของมวลดินหรือชั้นหินที่จะยอมให้น้ำภายใต้ความกดดันไหลซึมผ่านได้ โดยปกติมวลดินหรือชั้นหินที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้ดีจะมีช่องขนาดใหญ่และติดต่อถึงกันได้ สะดวกโดยตลอดประกอบกันเป็น Flow Channels ภายในมวลดินหรือหินนั้น คุณสมบัตินี้สามารถประเมินได้จากค่าความนำน้ำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) หรือค่าสัมประสิทธิ์ความซาบซึมน้ำ (Coefficient of Permeability) ซึ่งมีหน่วยเป็นหน่วยของความเร็ว หมายถึงระยะทางที่น้ำจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางดังกล่าวไปได้ในหนึ่งหน่วยเวลา สำหรับลักษณะของมวลดินหรือหินที่เกี่ยวกับการกักเก็บและยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้มีอยู่หลายประเภทเช่น

(1) หินที่มีการคัดขนาดดีมีความพรุนสูง ประกอบด้วยกรวดหรือทรายที่มีขนาดเท่า ๆ กัน และมีได้มีการยึดเกาะซึ่งกันและกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างหนาแน่น (Unconsolidated Deposit) ทำให้มีช่องขนาดใหญ่ มีค่าความพรุนสูง ยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้ง่าย

(2) หินที่มีการคัดขนาดเลวมีความพรุนต่ำ ประกอบด้วยกรวดทรายที่มีขนาดแตกต่างกันหลายขนาดโดยเม็ดทรายเล็ก ๆ แทรกอยู่ระหว่างเม็ดทรายและกรวดขนาดใหญ่ทำให้ปริมาณและขนาดของช่องเล็กกล

(3) หินที่มีการคัดขนาดดีและเนื้อหินเป็นหินเนื้อพรุนอยู่แล้ว ความพรุนจะสูงมากขึ้น

(4) หินที่มีการคัดขนาดดี แต่มีสารละลายแร่ธาตุอื่นมาผลึกแทรกตามช่องว่าง ความพรุนจะลดลงเช่น กรวด ทรายปนดินเหนียว (Sandy Gravelly Clay) สามารถเก็บกักน้ำได้น้อยและน้ำไหลผ่านได้ยาก

(5) หินที่มีความพรุนสูงเนื่องจากตัวของมันละลายน้ำได้เช่น เมื่อหินปูนทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็นสารละลายทำให้เกิดเป็นโพรงขึ้นในเนื้อหิน

(6) หินที่มีความพรุนเนื่องจากรอยแตกในเนื้อหิน เป็นลักษณะของหินที่มีรอยแตกภายในเนื้อหิน เนื่องจากการผุกร่อนทางกายภาพ เช่น แรงกระทำจากภายในโลก หรือการขยายตัวและหดตัวของหิน ทำให้เกิดรอยแตกขนาดใหญ่และต่อเนื่องกันภายในเนื้อหิน สามารถจะเป็นที่กักเก็บน้ำและยอมให้น้ำไหลผ่านได้

1.7.5.9 การซึมของน้ำ (Infiltration)

การซึมของน้ำ (Infiltration) หมายถึง กระบวนการที่น้ำเคลื่อนที่จากชั้นผิวดินลงสู่ชั้นดินที่อยู่ลึกลงไป ทั้งนี้อัตราการซึมจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะผิวดินและพืชปกคลุมดิน คุณสมบัติของดินไม่ว่าจะเป็น ความพรุน ความซาบซึมน้ำ ตลอดจนปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดิน (กิริติ ลีวัจนกุล, 2543)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าได้มีการพัฒนาสมการหาอัตราการซึมไว้มากมาย อย่างไรก็ตาม สมการที่มีชื่อเสียงและได้รับความนิยมคือสมการของ Horton ซึ่งพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1939 โดยพบว่าเมื่อเวลาเริ่มต้นอัตราการซึมจะสูงเนื่องจากดินมีปริมาตรช่องว่างอยู่มากทำให้น้ำแทรกซึมผ่านได้เร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการซึมจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งคงที่หรือเข้าสู่สภาวะสมดุล ในขณะที่เมื่อพิจารณาปริมาณการซึมสะสมพบว่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้นและมีแนวโน้มคงที่ในช่วงปลาย หรือเขียนเป็นสมการที่ 1-36 ดังนี้

$$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad \text{-----}(1-36)$$

เมื่อ f_o = อัตราการซึมเริ่มต้น (Initial Infiltration Rate)
 f_c = อัตราการซึมคงที่ (Constant Infiltration Rate)
 k = ค่าคงที่ของการซึม (Decay Constant)
 t = เวลา (Time)

ในปี ค.ศ. 1957 Phillip ได้พัฒนาสมการหาปริมาณการซึมสะสมและอัตราการซึมในแนวตั้งไว้ดังนี้

$$F(t) = St^{1/2} + Kt \quad \text{-----}(1-37)$$

โดยที่ $F(t)$ = ปริมาณการซึมสะสม

S = ค่าพารามิเตอร์ Sorptivity

K = ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ของดิน (Hydraulic Conductivity)

เมื่อทำการหาอนุพันธ์ของปริมาณการซึมสะสมจะได้อัตราการซึมในแนวตั้งดังแสดงในสมการที่ 1-39

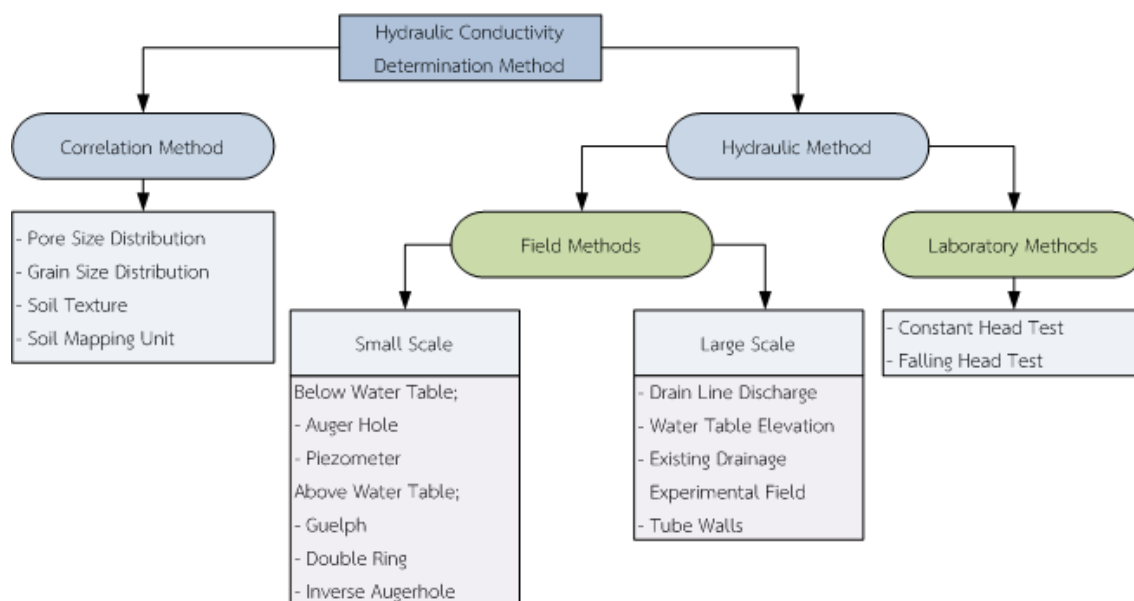
$$f(t) = \frac{1}{2}St^{-1/2} + K \quad \text{-----}(1-39)$$

นอกจากนี้ Phillip ยังได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงปริมาณการซึมสะสมของน้ำในแนวราบ โดยพบว่าปริมาณการซึมมีความสัมพันธ์กับรากที่สองของเวลาเป็นหลัก โดยมีค่าพารามิเตอร์ S เป็นตัวปรับค่าดังแสดงในสมการที่ 1-40 ดังนี้

$$F(t) = St^{1/2} \quad \text{-----}(1-40)$$

1.7.5.10 ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity)

ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านวัตถุตัวอย่างที่มีพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับการไหลของน้ำภายใต้ลาดชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient) หนึ่งหน่วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความซาบซึมน้ำ (Permeability) ในดิน ระดับความอิ่มตัวของน้ำในดิน (Degree of Saturation) ความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ (Density and Viscosity of Water) ในชั้นหินอุ้มน้ำประเภททราย (Sandy Aquifer) พบว่าค่าความนำน้ำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) ผันแปรตามค่าความพรุน (Porosity) กล่าวคือ ยิ่งความพรุนสูง ค่าความนำน้ำชลศาสตร์จะสูงตามไปด้วย สำหรับวิธีการหาค่าความนำน้ำชลศาสตร์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มวิธี ได้แก่ (1) วิธีสหสัมพันธ์ (Correlation Method) และ (2) วิธีชลศาสตร์ (Hydraulic Method) ดังภาพที่ 1-19



ภาพที่ 1-19 วิธีการหาค่าความนำน้ำชลศาสตร์
ที่มา : Ritzema (2006)

(1) วิธีสหสัมพันธ์ (Correlation Method)

วิธีสหสัมพันธ์ (Correlation Method) เป็นการหาสหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลความนำน้ำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) กับคุณสมบัติของดิน (Soil Properties) เช่น ขนาดของช่องว่างในดิน (Pore Size) การกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดิน (Particle Size Distribution) และโครงสร้างเนื้อดิน (Soil Texture) ที่สามารถตรวจวัดได้ง่าย วิธีสหสัมพันธ์สามารถประมาณการหาค่าความนำน้ำชลศาสตร์ได้ง่ายและรวดเร็วกว่าวิธีชลศาสตร์ ดังแสดงตัวอย่างสมการเอมไพริกัลที่ได้จากการทดลองของ Harzen และ Terzaghi ในสมการที่ 1-41 และสมการที่ 1-42 ดังนี้ (Stibinger, 2014)

$$K = 100(d_{10}^2) \quad \text{-----}(1-41)$$

เมื่อ K = ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity, cm/s)
 d_{10} = เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินขนาดของเม็ดดินที่ดิน 10% ของน้ำหนักดินทั้งหมดมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า (Grain Diameter at 10% of Grain Size Curve)

Terzaghi ได้พิจารณาข้อมูลความพรุนของดินมาหาค่าความนำน้ำชลศาสตร์ร่วมด้วย
 ดังนี้

$$K = 200(d_{10}^2)\phi^2 \quad \text{-----}(1-42)$$

เมื่อ K = ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity, cm/s)
 d_{10} = เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินขนาดของเม็ดดินที่ดิน 10% ของ
 น้ำหนักดินทั้งหมดมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า (Grain Diameter at 10%
 of Grain Size Curve)
 ϕ = ความพรุนของดิน (Number of Porosity, -)

วิธีสหสัมพันธ์ (Correlation Method) สามารถประยุกต์ใช้ได้หากวิธีอื่น ๆ มีความยุ่งยากโดยเฉพาะชั้นดินลึก อย่างไรก็ตามวิธีนี้เหมาะกับดินที่มีความซึมน้ำดี (Good Permeable Soil) เช่น ดินทราย ดินร่วนเบา เป็นต้น ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ที่ได้จากสมการเอมไพริคัลนี้อาจจะไม่ใช่ว่าจริงของความนำน้ำชลศาสตร์ แต่ให้ค่าประมาณการของขนาดความนำน้ำชลศาสตร์ได้

(2) วิธีชลศาสตร์ (Hydraulic Method)

ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ได้จากการทำการทดลองทางชลศาสตร์โดยใช้กฎของดาร์ซี (Darcy's Law) โดยจัดแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ (1) วิธีการทดลองภาคสนาม (Field Method) และ (2) วิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Method)

สำหรับวิธีการทดลองภาคสนาม (Field Method) สามารถทำได้ใน 2 ลักษณะ คือ (1) การทดลองภาคสนามในพื้นที่ขนาดเล็ก (Small Scale Field Method) และ (2) การทดลองภาคสนามในพื้นที่ขนาดใหญ่ (Large Scale Field Method) โดยการทดลองในพื้นที่ขนาดเล็กทำได้รวดเร็วและใช้ต้นทุนไม่มากนัก ในขณะที่การทดลองในพื้นที่ขนาดใหญ่ให้ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ที่มีความน่าเชื่อถือ ลดปัญหาของปัจจัยความแปรปรวนที่ค่อนข้างสูงของข้อมูล แต่ใช้ต้นทุนและเวลาในการทำการทดลองสูง โดยตรวจวัดค่าความนำน้ำชลศาสตร์ด้วยเครื่องพิซโซมิเตอร์ (Piezometer) หรือถังวัดอัตราการซึมของน้ำลงดินชนิดวงแหวนเดี่ยว (Single-Ring Infiltrometer) หรือถังวัดอัตราการซึมของน้ำลงดินชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer) (Stibinger, 2014) ดังภาพที่ 1-20 และภาพที่ 1-21

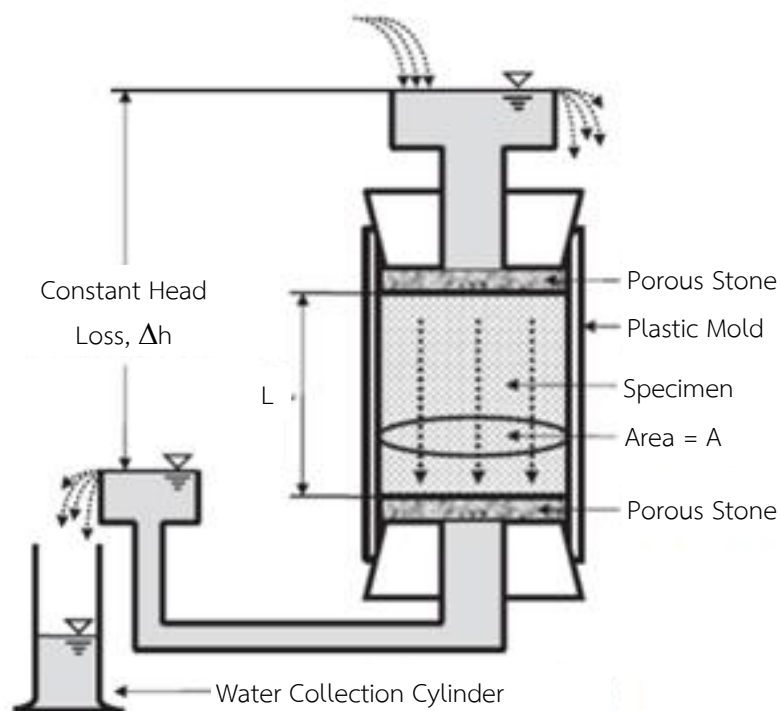


ภาพที่ 1-20 วิธีการตรวจวัดค่าความนำน้ำชลศาสตร์ในรูปของอัตราการซึมของน้ำลงดินโดยใช้ถังวัดอัตราการซึมของน้ำลงดินชนิดวงแหวนเดี่ยว

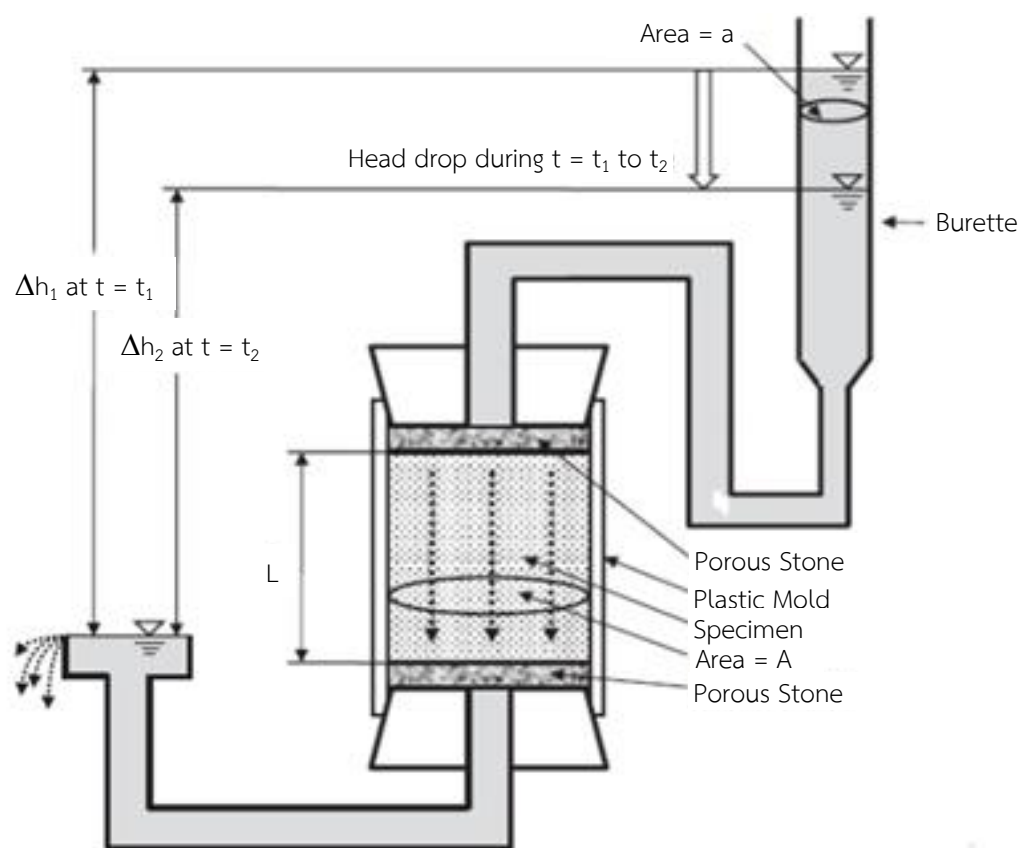


ภาพที่ 1-21 วิธีการตรวจวัดค่าความนำน้ำชลศาสตร์ในรูปของอัตราการซึมของน้ำลงดินโดยใช้ถังวัดอัตราการซึมของน้ำลงดินชนิดวงแหวนคู่

สำหรับวิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Method) สามารถทำได้รวดเร็ว และใช้ต้นทุนไม่มากนัก นิยมใช้สำหรับตัวอย่างดินที่มีค่าความนำน้ำชลศาสตร์น้อย วิธีการทดลองเพื่อหาค่าความนำน้ำชลศาสตร์ประกอบด้วย (1) การทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (Constant Head Test) และ (2) การทดสอบแบบระดับน้ำผันแปร (Falling Head Test) ดังภาพที่ 1-22 และภาพที่ 1-23



ภาพที่ 1-22 วิธีการทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (Constant Head Test)
ที่มา : UOMISAN (2019)



ภาพที่ 1-23 วิธีการทดสอบแบบระดับน้ำผันแปร (Falling Head Test)
ที่มา : UOMISAN (2019)

หลักเกณฑ์การเลือกใช้วิธีในการทำการทดสอบจะพิจารณาจากสภาพการระบายน้ำ (Drainage Characteristics) ความสามารถในการซึมน้ำ (Permeability Classification) และประเภทดิน (Soil Type) ดังแสดงในภาพที่ 1-24

K = 1 10 ⁻¹ 10 ⁻² 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹ 10 ⁻¹⁰ 10 ⁻¹¹ 10 ⁻¹² m/s												
Drainage Characteristics	GOOD						POOR		PRACTICALLY IMPERVIOUS			
Permeability Classification	HIGH		MEDIUM		LOW		VERY LOW		PRACTICALLY IMPERMEABLE			
Soil Type	GRAVELS	CLEAN SANDS			FISSURED & WEATHERS CLAYS		INTACT CLAYS					
					VERY FINE OR SILTY SANDS							
Test Methods:	LARGE CH CELLS	STANDARD CH CELLS			FH CELL			FH IN OEDOMETER				
Direct												
Indirect		x	COMPUTATION FROM PSD			x			FROM CONSOLIDATION DATA			

CH = Constant Head Test

FH = Falling Head Test

PSD = Particle Size Distribution Analysis

ภาพที่ 1-24 หลักเกณฑ์การเลือกใช้วิธีการทดสอบ

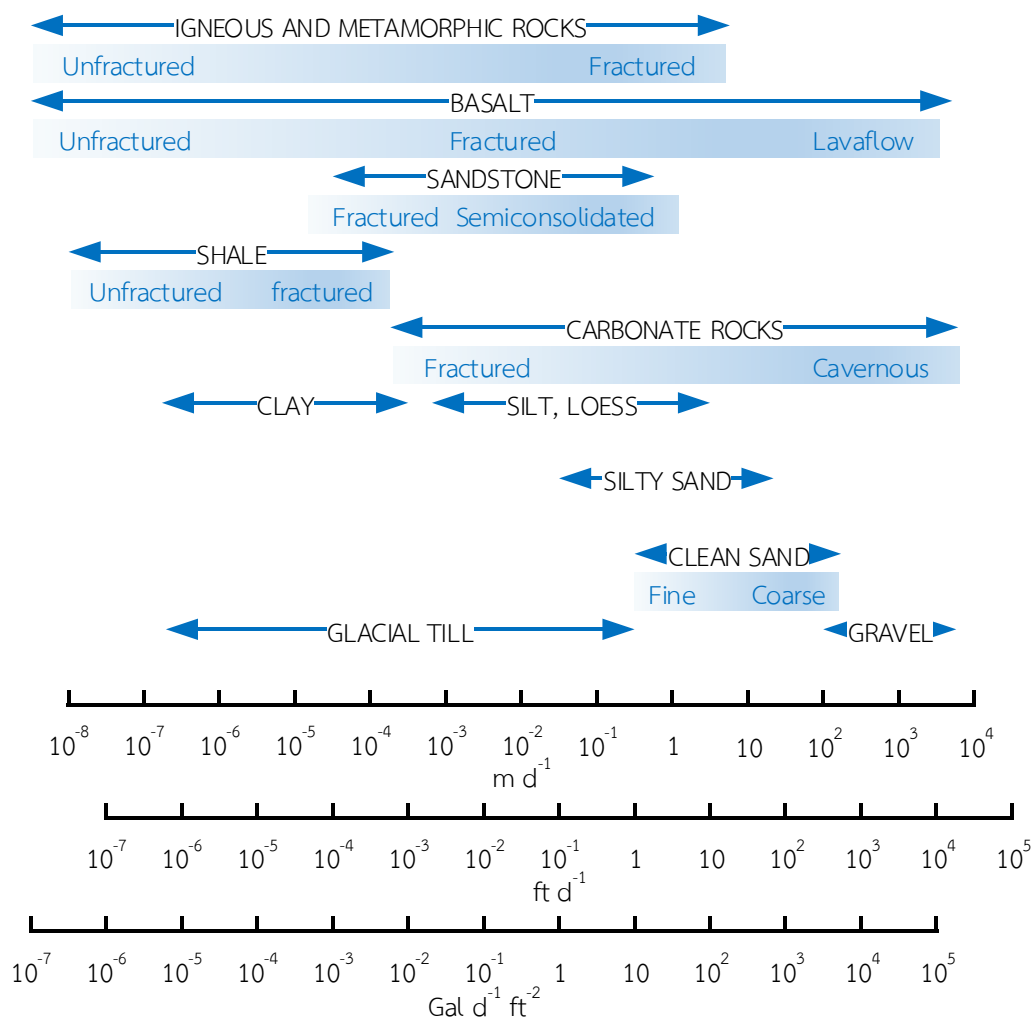
ช่วงข้อมูลค่าความนำน้ำชลศาสตร์ของดินจะผันแปรแตกต่างกันตามประเภทของเนื้อดินดังสรุปไว้ในตารางที่ 1-7 ซึ่งศึกษาไว้โดย Ritzema ในปี ค.ศ. 2006 และภาพที่ 1-25 ที่แนะนำโดย Heath ในปี ค.ศ. 1983

ตารางที่ 1-7 ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ของดิน

เนื้อดิน	ค่าความนำน้ำชลศาสตร์ของดิน (เมตรต่อวัน)
ดินกรวดทรายหยาบ (Gravelly Coarse Sand)	10-50
ดินทราย (Medium Sand)	1-5
ดินร่วนปนทราย (Sandy Loam) ดินทรายละเอียด (Fine Sand)	1-3
ดินร่วน (Loam) ดินร่วนปนดินเหนียว (Clay Loam) ดินเหนียว (Clay) (ลักษณะโครงสร้างที่ดี)	0.5-2
ดินร่วนปนทรายละเอียดมาก (Very Fine Sandy Loam)	0.2-0.5
ดินร่วนปนดินเหนียว (Clay Loam) และดินเหนียว (ลักษณะโครงสร้างไม่ดี)	0.002-0.2
ดินเหนียวแข็ง (Dense Clay) (ไม่มีช่องว่างในดิน)	<0.002

ที่มา : Ritzema (2006)

จากข้อมูลในตารางพบว่าดินทรายมีค่าความนำน้ำชลศาสตร์ของดินสูงกว่าดินร่วนและดินเหนียวตามลำดับ เนื่องจากขนาดช่องว่างในดินทรายที่ค่อนข้างใหญ่ ทำให้น้ำสามารถเคลื่อนที่และซาบซึมน้ำได้เร็ว



ภาพที่ 1-25 ช่วงข้อมูลค่าความนำน้ำชลศาสตร์ของดิน
ที่มา : Heath (1983)

1.7.6 การเก็บตัวอย่างดิน (Soil Sampling)

การเก็บตัวอย่างดินที่ได้จากการสำรวจมี 2 ประเภท คือ (ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, 2562)

1.7.6.1 ตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Soil Sample)

ตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Soil Sample) เป็นตัวอย่างดินที่ถูกเก็บขึ้นมาโดยคุณสมบัติของดินมีสภาพใกล้เคียงกับสภาพที่เป็นอยู่เดิมตามธรรมชาติ เช่น ความหนาแน่น ความพรุน อัตราส่วนช่องว่างในดิน ปริมาณความชื้นในดิน เป็นต้น ตัวอย่างดินคงสภาพได้แก่ ตัวอย่างดินที่เก็บได้จากกระบอกเปลือกบางที่มีขนาดตั้งแต่ 3 นิ้วขึ้นไป กระบอกแบบลูกสูบ (Piston Sampler) หรือกระบอกเก็บ

ตัวอย่างแบบ 2 ชั้น เป็นต้น ซึ่งมีการกระทบกระเทือนชั้นดินน้อยที่สุด ถือว่าเป็นตัวอย่างดินที่มีคุณภาพดีที่สุดและสามารถใช้ทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ในห้องทดลองได้เกือบทุกอย่าง

1.7.6.2 ตัวอย่างดินที่เปลี่ยนสภาพ (Disturbed Soil Sample)

ตัวอย่างดินที่เปลี่ยนสภาพ (Disturbed Soil Sample) เป็นตัวอย่างดินที่ไม่พิถีพิถันในการเก็บ และอาจใช้เครื่องมือและอุปกรณ์อย่างง่าย เช่น ขุดขึ้นมาหรือใช้สว่านเจาะ ตัวอย่างดินที่เปลี่ยนสภาพได้แก่ ตัวอย่างดินที่เก็บได้จากกระบอกผ่า (Split Spoon) ในการตอกทดลอง หรือกระบอกเปลือกบาง (Thin Wall/Shelby Tube) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ซึ่งจะได้ตัวอย่างดินที่มีการเปลี่ยนสภาพไปจากเดิม เช่น มีการอัดแน่น หรือการจับตัวตามธรรมชาติถูกทำลายเพราะแรงกระแทก อาจใช้ในการทดลองได้บางอย่าง เช่น Atterberg's limit การหาขนาดเม็ดดิน เป็นต้น หรือใช้ในวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบคุณสมบัติของดินอย่างสังเขป เช่น สีดิน ลักษณะของดิน การจำแนกอนุภาคเม็ดดิน เป็นต้น

สำหรับการเก็บตัวอย่างดินเพื่อศึกษาการเติมน้ำใต้ดินและวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ดินนั้นจะจัดเก็บตัวอย่างดินทั้งในลักษณะคงสภาพและเปลี่ยนสภาพจากระดับผิวดินถึงระดับความลึกที่เลเยอร์รากพืช

1.7.7 การจัดจำแนกดิน (Soil Classification)

1.7.7.1 ระบบการจำแนกดิน (Soil Classification Systems)

คุณสมบัติทางกายภาพของดิน และการจัดจำแนกดินมีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานทางด้านธรณีวิทยา เกษตรกรรม และงานทางด้านวิศวกรรม ระบบการจัดจำแนกดิน (Soil Classification Systems) ได้มีการพัฒนาขึ้นมาหลากหลายและนิยมใช้งานกันทั่วโลก อย่างไรก็ตาม ระบบการจำแนกดินสามารถจัดแบ่งได้ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ (1) ระบบการจำแนกดินสำหรับใช้ในงานด้านวิศวกรรม และ (2) ระบบการจำแนกดินสำหรับใช้ในงานด้านวิทยาศาสตร์ (Ruben et al., 2015) สำหรับระบบการจำแนกดินในงานด้านวิศวกรรมที่สำคัญและได้รับความนิยมสูงสุดได้แก่

- (1) ระบบการจำแนกดินของกรมการเกษตรในประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Department of Agriculture, USDA Textural Soil Classification)

ระบบการจำแนกดินโดยวิธี USDA อาศัยหลักการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคดิน (Particle Size Distribution) และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างง่าย

- (2) ระบบการจำแนกดินของสมาคมอเมริกันด้านทางหลวงแผ่นดินและการขนส่ง (American Association of State Highway and Transportation officials (AASHTO) Soil Classification)

ระบบการจำแนกดินโดยวิธี AASHTO อาศัยหลักการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคดิน (Particle Size Distribution) และลักษณะความเป็นพลาสติกของดิน (Soil Plasticity) และส่วนใหญ่มักนิยมใช้ในกรมทางหลวงของรัฐและประเทศ

(3) ระบบการจำแนกดินแบบ USCS (Unified Soil Classification System)

ระบบการจำแนกดินโดยวิธี USCS อาศัยหลักการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคดิน (Particle Size Distribution) ขีดจำกัดของของเหลว (Liquid Limit) และลักษณะความเป็นพลาสติกของดิน (Soil Plasticity) ตลอดจนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในดิน (Organic Matter Concentration) และมักนิยมใช้ในงานด้านธรณีเทคนิควิศวกรรม

1.7.7.2 ระบบการจำแนกดินโดยวิธี USDA

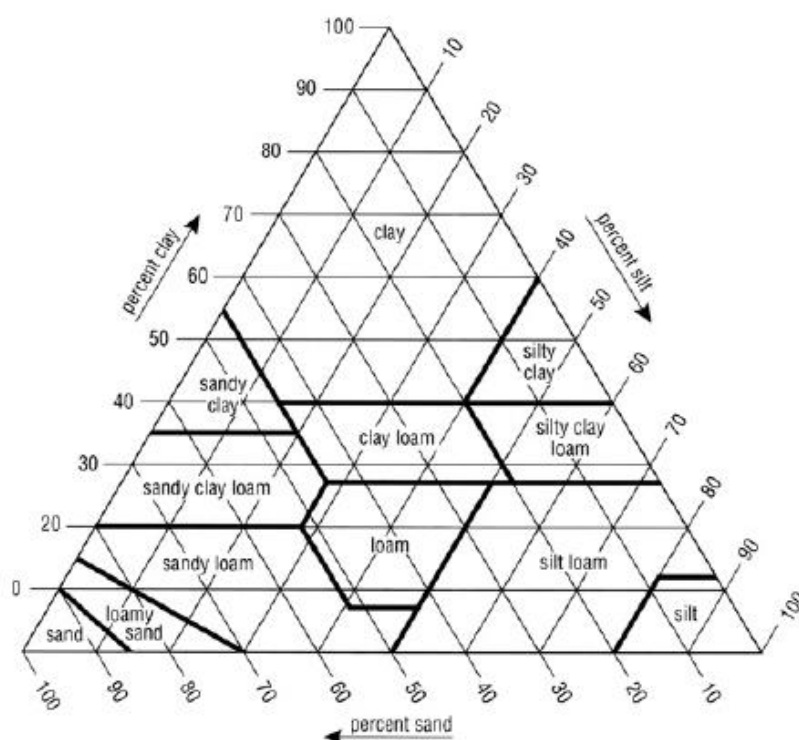
ระบบการจำแนกดินของกรมการเกษตรในประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Department of Agriculture, USDA Textural Soil Classification) หรือที่เรียกสั้น ๆ ว่าวิธี USDA นิยมใช้แพร่หลายทั่วโลก โดยมีหลักเกณฑ์เบื้องต้นในการจำแนกดินตามขนาดอนุภาคดังแสดงในตารางที่ 1-8

ตารางที่ 1-8 หลักเกณฑ์เบื้องต้นในการจำแนกดินตามขนาดอนุภาคโดยวิธี USDA

ชนิดดิน	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดิน (มิลลิเมตร)
ดินทราย (Sand)	2.0–0.005
ดินทรายแป้ง (Silt)	0.05–0.002
ดินเหนียว (Clay)	เล็กกว่า 0.002

ที่มา : Ruben et al. (2015)

นอกจากนี้ยังได้แบ่งย่อยชนิดดินออกเป็น 12 คลาส โดยแต่ละคลาสแสดงการจัดจำแนกดินในลักษณะที่เรียกว่า สามเหลี่ยม USDA (USDA Triangle) ดังภาพที่ 1-26



ภาพที่ 1-26 สามเหลี่ยม USDA

ที่มา : Ruben et al. (2015)

นอกจากนี้ในระบบการจัดจำแนกดินตามโครงสร้างดินโดยวิธี USDA ยังได้มีการกำหนดหลักเกณฑ์เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างทรายและกรวดเพิ่มเติม 5 กลุ่มย่อยดังแสดงในตารางที่ 1-9

ตารางที่ 1-9 หลักเกณฑ์ในการจำแนกดินย่อยโดยวิธี USDA

ชนิดดิน	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดิน (มิลลิเมตร)
ดินทรายขนาดละเอียดมาก (Very Fine Sand)	0.05–0.10
ดินทรายขนาดเล็ก (Fine Sand)	0.10–0.25
ดินทรายขนาดกลาง (Medium Sand)	0.25–0.50
ดินทรายหยาบ (Coarse Sand)	0.50–1.00
ดินทรายหยาบมาก (Very Coarse Sand)	1.00–2.00

ที่มา : Ruben et al. (2015)

อย่างไรก็ดี ระบบการจัดจำแนกดินตามโครงสร้างดินโดยวิธี USDA ไม่ได้นำข้อมูลการกระจายของหิน (Rock Fragment) หรือดินที่มีสารอินทรีย์อยู่ภายใน (Organic Soil) มาประกอบการพิจารณา

1.7.7.3 ระบบการจำแนกดินโดยวิธี AASHTO

ระบบการจำแนกดินของสมาคมอเมริกันด้านทางหลวงแผ่นดินและการขนส่ง (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Soil Classification) หรือที่เรียกว่า ระบบการจำแนกดินโดยวิธี AASHTO ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1929 และได้มีการปรับปรุงหลักเกณฑ์การจำแนกดินอยู่หลายครั้งและปรับปรุงล่าสุดตามที่คณะกรรมการด้านการวิจัยถนนทางหลวง (Highway Research Board) ได้เสนอในปี ค.ศ. 1945

ระบบการจำแนกดินโดยวิธี AASHTO ได้จำแนกดินออกเป็น 7 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 และ A-7 โดยดินในกลุ่ม A-1, A-2, A-3 เป็นกลุ่มดินที่มีขนาดอนุภาคดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 35% และดินในกลุ่ม A-4, A-5, A-6, A-7 เป็นกลุ่มดินที่มีขนาดอนุภาคดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 35% สำหรับหลักเกณฑ์การจำแนกดินอาศัยขนาดอนุภาคดิน (Grain Size) ลักษณะความเป็นพลาสติกของดิน (Plasticity) (Ruben et al., 2015) ดังสรุปไว้ในตารางที่ 1-10

ตารางที่ 1-10 หลักเกณฑ์การจำแนกดินโดยวิธี AASHTO

General Classification		Granular Materials (35% or less of total sample passing No.200)					
Group Classification	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Sieve Analysis (percentage passing)							
No.10	50 max.						
No.40	30 max.	50 max.	51 min.				
No.200	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.
Characteristics of Fraction Passing No.40							
Liquid Limit				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity Index	6 max.		NP	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Usual Types of Significant Constituent Material	Stone fragments, gravel, and sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand			
General Subgrade Rating	Excellent to good						
General Classification		Silt-Clay Materials (more than 35% of total sample passing No.200)					
Group Classification	A-4		A-5		A-6		A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b
Sieve Analysis (percentage passing)							
No.10							
No.40							
No.200	36 min.		36 min.		36 min.		36 min.
Characteristics of Fraction Passing No.40							
Liquid Limit	40 max.		41 min.		40 max.		41 min.
Plasticity Index	10 max.		10 max.		11 min.		11 min.

ตารางที่ 1-10 (ต่อ)

General Classification	Silt-Clay Materials (more than 35% of total sample passing No.200)			
Group Classification	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b
Usual Types of Significant Constituent Material	Silty soils		Clayey soils	
General Subgrade Rating	Fair to poor			

^a For A-7-5, $PI \leq 30$; ^b For A-7-6, $PI > 30$

ที่มา : Das (2009)

1.7.7.4 ระบบการจำแนกดินโดยวิธี USCS

ระบบการจำแนกดินโดยวิธี USCS (Unified Soil Classification System) หรือวิธี USCS ได้รับความนิยมสูงสุดในงานทางด้านวิศวกรรม วิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1948 โดย Casagrande สำหรับใช้ในงานก่อสร้างสนามบินภายใต้การทำงานร่วมกันของ Army Corps of Engineers ร่วมกับ US Bureau of Reclamation ในประเทศสหรัฐอเมริกา และในปี ค.ศ. 1952 Waterways Experiment Station ได้ทำการปรับปรุงหลักเกณฑ์การจำแนกดินใหม่เพื่อให้มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับงานเขื่อน งานฐานราก และงานก่อสร้างอื่น ๆ ลักษณะสำคัญของระบบการจำแนกดินแบบ USCS ที่แตกต่างจากวิธี USDA และ AASHTO ก็คือได้นำความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในดิน (Organic Matter Concentration) และกรวด (Gravel) มาพิจารณาในการจัดจำแนก (Ruben et al., 2015)

ระบบการจำแนกดินโดยวิธี USCS นี้ได้จัดกลุ่มดินออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

(1) ดินที่มีขนาดเม็ดดินหยาบ (Coarse-Grained Soil)

ดินที่มีขนาดเม็ดดินหยาบ (Coarse-Grained Soil) เป็นดินที่มีคุณลักษณะของความเป็นกรวดและทรายซึ่งสามารถผ่านตะแกรงร่อนดินเบอร์ 200 ได้น้อยกว่า 50% สัญลักษณ์ที่ใช้จะนำด้วย G หรือ S โดยที่ G มาจากคำว่า กรวด (Gravel) หรือดินเม็ดหยาบ (Gravelly Soil) และ S มาจากคำว่า ทราย (Sand) หรือดินปนทราย (Sandy Soil)

(2) ดินที่มีขนาดเม็ดดินละเอียด (Fine-Grained Soil)

ดินที่มีขนาดเม็ดดินละเอียด (Fine-Grained Soil) เป็นดินที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนดินเบอร์ 200 ได้มากกว่าหรือเท่ากับ 50% สัญลักษณ์ที่ใช้จะนำด้วย M ที่มาจากคำว่า ทรายแป้งที่ไม่มีสารอินทรีย์ (Inorganic Silt) และ C ที่มาจากคำว่า ดินเหนียวที่ไม่มีสารอินทรีย์ (Inorganic Clay) หรือ O ที่มาจากคำว่า ทรายแป้งและดินเหนียวที่มีสารอินทรีย์ (Organic Silts and Clays) นอกจากนี้สัญลักษณ์ Pt ถูกนำมาใช้จำแนกถ่านหินชนิดร่วน (Peat) ดินโคลน (Muck) และดินที่มีสารอินทรีย์สูง (Highly Organic Soils)

ระบบการจำแนกดินโดยวิธี USCS นี้ยังได้ใช้สัญลักษณ์เพิ่มเติมดังนี้ W (Well-Graded) เพื่อระบุความคละของอนุภาคดินดี P (Poorly-Graded) ความคละของอนุภาคดินแย L (Low Plasticity) คุณสมบัติความเป็นพลาสติกของดินต่ำ และ H (High Plasticity) คุณสมบัติความเป็นพลาสติกของดินสูง ดังนั้น สัญลักษณ์ที่ใช้กับกลุ่มดินที่มีขนาดเม็ดดินหยาบ (Coarse-Grained Soil) ประกอบด้วย GW, GP, GC, GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM และ GP-GC สำหรับสัญลักษณ์ที่ใช้กับกลุ่มดินที่มีขนาดเม็ดดินละเอียด (Fine-Grained Soil) ประกอบด้วย CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML และ Pt ดังสรุปไว้ในตารางที่ 1-11

ตารางที่ 1-11 หลักเกณฑ์การจำแนกดินโดยวิธี USCS (อ้างอิงภาพที่ 1-27)

Criteria for Assigning Group Symbols				Group Symbol
Coarse-Grained Soils: More than 50% of retained on No.200 sieve	Gravels: More than 50% of coarse fraction retained on No.4 sieve	Clean Gravels Less than 5% fines ^a Gravels with fines More than 12% fines ^{a,d}	$C_u \geq 4$ and $0 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 4$ and/or $1 > C_c > 3^c$ $PI < 4$ or plots below "A" line $PI > 7$ and plots on or above "A" line	GW GP GM GC
	Sands: 50% or more of coarse fraction passes No.4 sieve	Clean Sands Less than 5% fines ^b Sands with fines More than 12% fines ^{b,d}	$C_u \geq 6$ and $0 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 6$ and/or $1 > C_c > 3^c$ $PI < 4$ or plots below "A" line $PI > 7$ and plots on or above "A" line	SW SP SM SC
Fine-Grained Soils: 50% or more passes No.200 sieve	Silts and Clays: Liquid limit less than 50	Inorganic Organic	$PI > 7$ and plots on or above "A" line ^e $PI < 4$ or plots below "A" line ^e (LL-Oven Dried)/(LL-Not Dried) < 75	CL ML OL
	Silts and Clays: Liquid limit 50 or more	Inorganic Organic	PI plots on or above "A" line PI plots below "A" line (LL-Oven Dried)/(LL-Not Dried) < 75	CH MH OH
Highly Organic Soils	Primarily organic matter, dark in color and organic odor			Pt

^a Gravels with 5 to 12% fines require dual symbols: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC

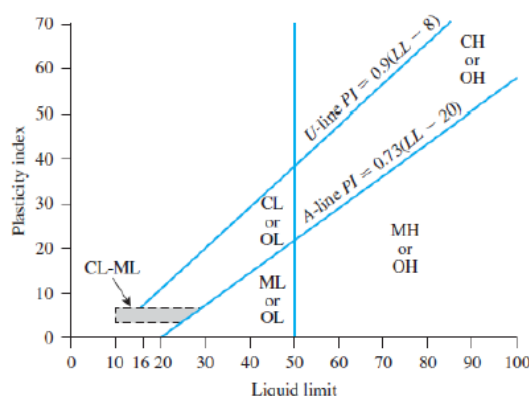
^b Sands with 5 to 12% fines require dual symbols: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC

^c $C_u = D_{60}/D_{10}$; $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$

^d If $4 \leq PI \leq 7$ and plots in the hatched area, use dual system: GC-GM or SC-SM

^e If $4 \leq PI \leq 7$ and plots in the hatched area, use dual system: CL-ML

ที่มา : Das (2009)

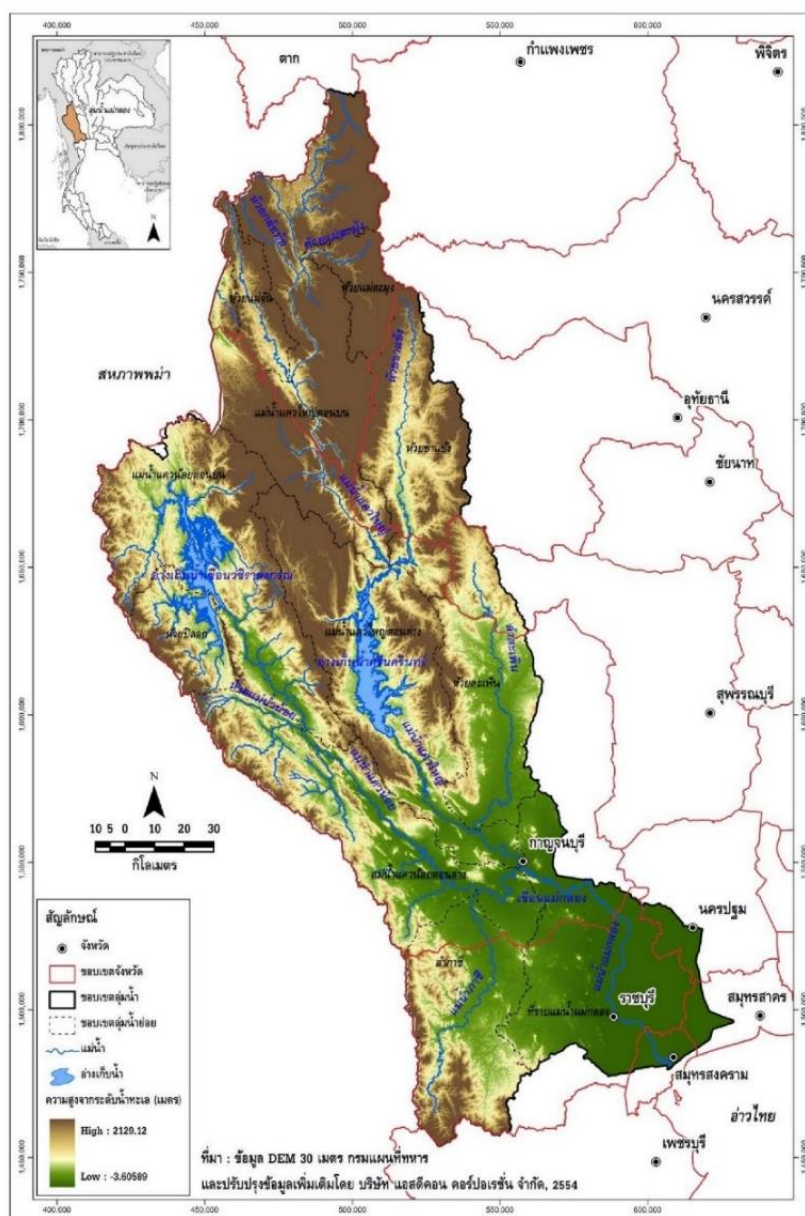


ภาพที่ 1-27 แผนภูมิความเป็นพลาสติกของดิน
ที่มา : Das (2009)

1.8 พื้นที่ศึกษา

1.8.1 กลุ่มน้ำแม่กลอง (Mae Klong Basin)

กลุ่มน้ำแม่กลอง (Mae Klong Basin) เป็นกลุ่มน้ำขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ โดยมีพื้นที่รับน้ำประมาณ 30,836 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ 8 จังหวัดทางภาคตะวันตกและภาคกลางบางส่วน ได้แก่ กาญจนบุรี ราชบุรี เพชรบุรี สมุทรสงคราม สมุทรสาคร นครปฐม สุพรรณบุรี และอุทัยธานี อาณาเขตของกลุ่มน้ำแม่กลองทางด้านทิศเหนือติดต่อบริเวณพื้นที่จังหวัดตาก ทิศตะวันตกจรดชายแดนพม่าบริเวณเทือกเขาตะนาวศรี ทิศตะวันออกจะติดต่อกับพื้นที่บางส่วนของจังหวัดอุทัยธานี สุพรรณบุรี และนครปฐม และทางด้านทิศใต้ติดต่อกับจังหวัดเพชรบุรี มีแม่น้ำที่สำคัญในบริเวณพื้นที่ ได้แก่ แม่น้ำแควใหญ่ หรือแม่น้ำศรีสวัสดิ์ซึ่งมีต้นกำเนิดน้ำบริเวณเทือกเขาถนนธงชัย ไหลผ่านอำเภอสองขันบุรี อำเภอดอนเจดีย์ และอำเภอสรีสวัสดิ์ในเขตจังหวัดกาญจนบุรี ความยาวตลอดลำน้ำทั้งสิ้นประมาณ 380 กิโลเมตร และแม่น้ำแควน้อยหรือแม่น้ำไทรโยคซึ่งมีต้นกำเนิดน้ำบริเวณเทือกเขาตะนาวศรี ไหลผ่านอำเภอดอนเจดีย์ จังหวัดกาญจนบุรี มีความยาวตลอดลำน้ำทั้งสิ้น 320 กิโลเมตร แม่น้ำแควใหญ่และแควน้อยไหลมาบรรจบกันที่อำเภอมะกลอง จังหวัดกาญจนบุรี กลายเป็นแม่น้ำแม่กลอง จากนั้นไหลผ่านจังหวัดราชบุรีและลงสู่อ่าวไทยที่จังหวัดสมุทรสงครามโดยมีความยาวประมาณ 132 กิโลเมตรดังแสดงในภาพที่ 1-26 สภาพภูมิประเทศสองฝั่งแม่น้ำแควใหญ่นั้นเป็นเขาสูงและป่าทึบ มีแหล่งที่สงวนไว้เป็นอุทยานแห่งชาติและเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าหลายแห่งเช่น เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าสลักพระ อุทยานแห่งชาติศรีนครินทร์ และอุทยานแห่งชาติเอราวัณ เป็นต้น สำหรับสภาพภูมิประเทศทั่วไปในกลุ่มน้ำแควน้อยเป็นภูเขาใหญ่น้อยเรียงสลับซับซ้อนและสูงชัน บางแห่งเป็นหน้าผาสูง บางแห่งเป็นที่ราบ สภาพป่าส่วนใหญ่เป็นป่าเบญจพรรณและป่าดงดิบ มีป่าไผ่แซมอยู่ทั่วไป มีป่าสงวนและเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าหลายแห่ง ได้แก่ ป่าสงวนแห่งชาติเขาช้างเผือก ป่าสงวนแห่งชาติห้วยเขย่ง ป่าสงวนแห่งชาติเขาพระฤาษี ป่าสงวนแห่งชาติวังใหญ่-แม่น้ำน้อย เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าทุ่งใหญ่นเรศวร เป็นต้น (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2560)



ภาพที่ 1-28 แผนที่ลุ่มน้ำแม่กลอง

ที่มา : สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) (2555)

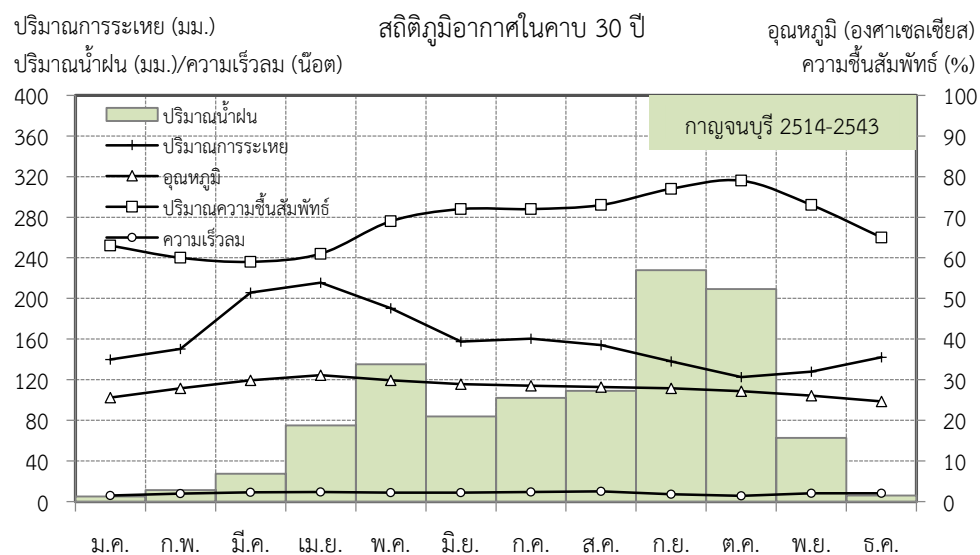
1.8.2 สภาพทางอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง (Meteo-Hydrological Characteristics of Mae Klong Basin)

จากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งเป็นข้อมูลสถิติภูมิอากาศในคาบ 10-30 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2514/2524/2534-2543 ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองจำนวน 4 สถานีในเขตจังหวัดกาญจนบุรี สุพรรณบุรี และเพชรบุรี ได้แสดงผลในภาพที่ 1-29 และสรุปสถิติข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายเดือนและรายปีในพื้นที่ศึกษาไว้ในตารางที่ 1-12

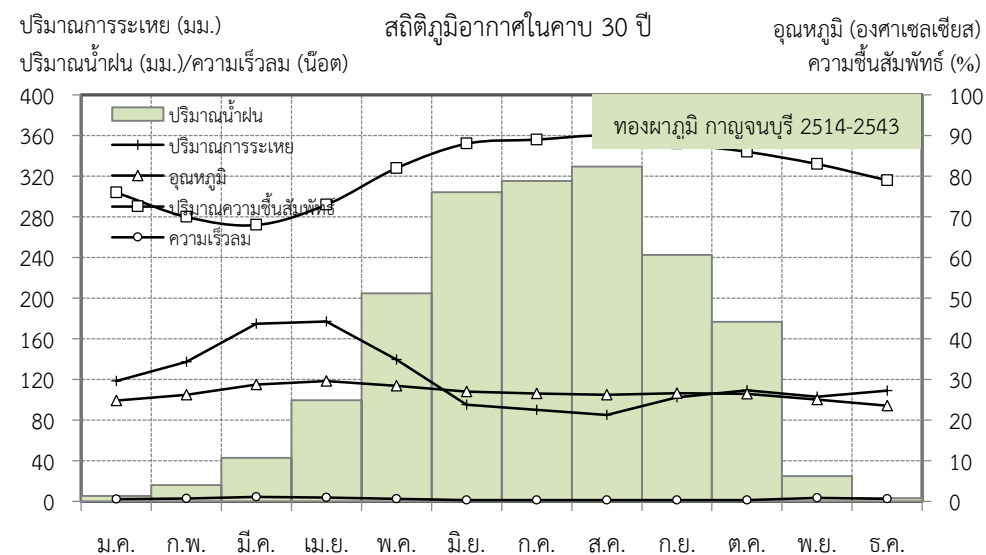
ตารางที่ 1-12 สรุปสถิติข้อมูลอุทุนิยมวิทยารายเดือนและรายปีในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง

ประเภทข้อมูลอุทุนิยมวิทยา	คุณสมบัติข้อมูลรายเดือน			คุณสมบัติข้อมูลรายปี
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	23.50	31.10	27.56	–
ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	59.00	90.00	74.94	–
ปริมาณการระเหย (มิลลิเมตร)	84.90	215.70	141.09	1,693.03
ความเร็วลม (น็อต)	0.30	5.80	2.06	–
ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร)	2.90	329.50	101.38	1,216.53
จำนวนวันฝนตกเฉลี่ย (วัน)	0.60	27.20	9.65	115.75

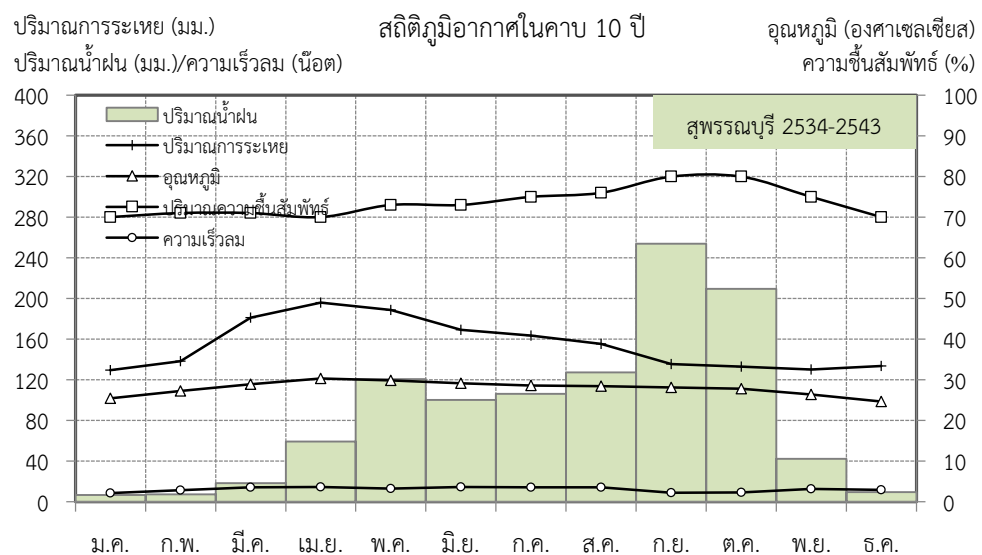
อุณหภูมिरายเดือนเฉลี่ยในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองผันแปรอยู่ระหว่าง 23.50–31.10 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 59–90 เปอร์เซ็นต์ และค่าความเร็วลมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.30–5.80 น็อต อย่างไรก็ตาม ข้อมูลอุณหภูมิ ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ และข้อมูลความเร็วลมที่ทำการรวบรวมได้ในพื้นที่ศึกษาของแต่ละสถานีมีลักษณะและรูปแบบของข้อมูลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้มีความแตกต่างของข้อมูลที่ทำกรตรวจวัดทั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งค่อนข้างน้อยอีกด้วย ปริมาณฝนส่วนใหญ่เริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนพฤศจิกายน โดยปริมาณฝนสูงสุดส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างเดือนสิงหาคม–ตุลาคม และมีแนวโน้มลดลงในเดือนพฤศจิกายนซึ่งเป็นช่วงปลายฤดูฝน ในขณะที่ปริมาณฝนในช่วงฤดูแล้งตั้งแต่เดือนธันวาคมถึงเดือนเมษายนนั้นมีปริมาณค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงต้นฤดูแล้งในเดือนธันวาคมถึงมกราคม ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 1,217 มิลลิเมตร ในขณะที่ข้อมูลปริมาณการระเหยของน้ำในพื้นที่พบว่า ในช่วงต้นฤดูแล้งนั้นปริมาณการระเหยของน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้น และเพิ่มสูงสุดในเดือนเมษายนเป็นส่วนใหญ่ และมีแนวโน้มลดลงในช่วงฤดูฝน โดยมีค่าปริมาณการระเหยรายปีเฉลี่ยสูงถึง 1,693 มิลลิเมตร



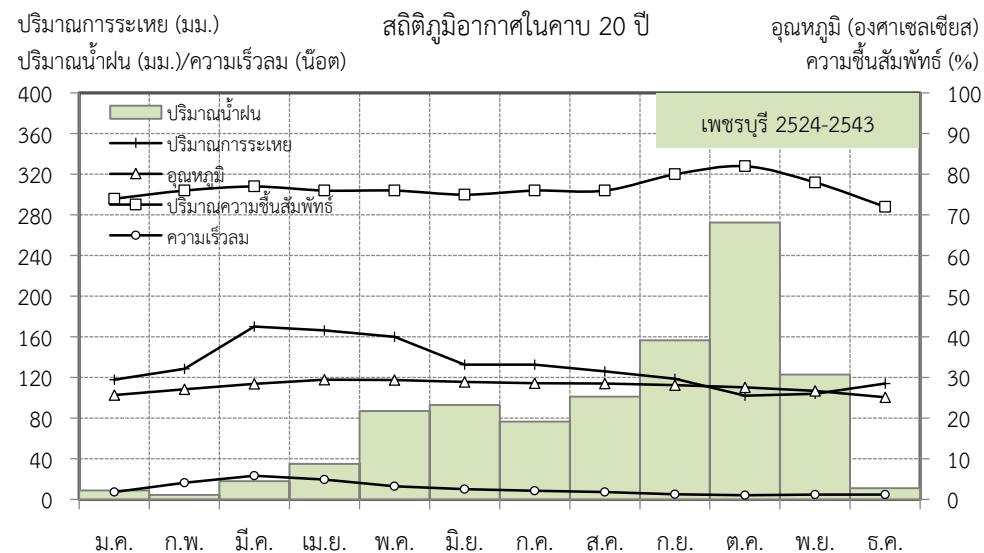
(a) สถิติภูมิอากาศในคาบ 30 ปี ของสถานีจังหวัดกาญจนบุรี



(b) สถิติภูมิอากาศในคาบ 30 ปี ของสถานีอำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี



(c) สถิติภูมิอากาศในคาบ 10 ปี ของสถานีจังหวัดสุพรรณบุรี



(d) สถิติภูมิอากาศในคาบ 20 ปี ของสถานีจังหวัดเพชรบุรี

ภาพที่ 1-29 สถิติภูมิอากาศในคาบ 10-30 ปี ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง

1.8.3 ทรัพยากรดินในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง (Soil Resources in Mae Klong Basin)

จากรายงานโครงการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองและลุ่มน้ำท่าจีนของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล โดยอาศัยข้อมูลรายงานและแผนที่กลุ่มชุดดินระดับจังหวัด มาตราส่วน 1:50,000 ปี พ.ศ. 2545 ของกรมพัฒนาที่ดินพบว่า ลุ่มน้ำแม่กลองมี 25 กลุ่มชุดดินได้แก่ ชุดดินที่ 1-4, 6-8, 10-12, 16-18, 20-21, 31, 33, 35-36, 38, 40, 43, 48, 56 และ 62 โดยมีสัดส่วนของพื้นที่ดิน 27.31% เป็นชุดดินที่ 8 ซึ่งมีลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียว พบได้ทั่วไปแถบบริเวณที่ราบลุ่มชายฝั่งทะเล รองลงมาคือชุดดินที่ 4 คิดเป็น 20.40% และกลุ่มชุดดินที่ 20 พบน้อยที่สุดในพื้นที่ศึกษา มีเนื้อดินบนเป็นดินร่วนปนทรายหรือดินทราย ส่วนดินด้านล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายหรือดินร่วนเหนียว พบในสภาพพื้นที่ราบเรียบหรือค่อนข้างเรียบ และเป็นดินลึกมาก ดินมีการระบายน้ำเลวถึงค่อนข้างเลว (บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด, 2548)

1.8.4 ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง (Hydro-Geological Characteristics of Mae Klong Basin)

จากรายงานโครงการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองและลุ่มน้ำท่าจีนของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้จำแนกภูมิประเทศออกเป็น 4 แบบซึ่งมีความสำคัญต่อลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองดังนี้คือ (บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด, 2548)

(1) พื้นที่ราบน้ำท่วมถึงและที่ราบน้ำขึ้นถึง มีค่าระดับ 0-15 เมตร รทก. เป็นแหล่งสะสมตะกอนน้ำพา (Floodplain Deposits) ตะกอนดินดอนสามเหลี่ยมและดินโคลนทะเล ซึ่งได้แก่ ดินดอนสามเหลี่ยมธารน้ำ (Fluvatile Delta) ตะกอนดินดอนสามเหลี่ยมน้ำกร่อย (Delta Brackish Sediments) และตะกอนดินดอนสามเหลี่ยมน้ำเค็ม (Delta Marine Sediments)

(2) พื้นที่ลานตะพักต่ำ มีค่าระดับ 5-50 เมตร รทก. เป็นแหล่งสะสมตะกอนดินเหนียว ทรายแป้ง ทราย และกรวด ซึ่งผ่านการผุพังเป็นเวลายาวนาน จนกลายเป็นสภาพเป็นลูกกรังและดินปนลูกกรัง นอกจากนี้ยังมีตะกอนรูปพัดเก่า ได้แก่ ตะกอนรูปพัดตอนเจดีย์ และตะกอนรูปพัดใหม่ ได้แก่ ตะกอนรูปพัดกำแพงแสนหรือตะกอนรูปพัดแม่กลอง โดยทั่วไปตะกอนรูปพัดที่กล่าวประกอบด้วย ชั้นกรวด ทราย ทรายละเอียด ซึ่งได้ผ่านการผุพังทำลายเป็นระยะอันยาวนาน จนเปลี่ยนเป็นศิลาแลงปิดทับอยู่ชั้นบนถัดลงไปเป็นชั้นดินปนลูกกรัง

(3) พื้นที่ลานตะพักสูง มีระดับ 50-150 เมตร รทก. เป็นแหล่งสะสมตะกอนทับถมบนลานตะพัก (Terrace Deposits) ประกอบด้วย ชั้นศิลาแลงหนาปิดทับบนชั้นทราย ทรายแป้งปนกรวด

(4) พื้นที่ภูเขาหินแข็ง มีระดับความสูงเกินกว่า 150 เมตร รทก. ซึ่งเป็นขอบของที่ราบลุ่มแม่น้ำท่าจีน-แม่กลอง

โครงการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองและลุ่มน้ำท่าจีนของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลรายงานว่า ในพื้นที่ทางด้านทิศตะวันออกของแอ่งแม่กลองที่มีลักษณะเป็นที่ราบลุ่มมีชั้นน้ำใต้ดินตะกอนร่วน (Unconsolidated Aquifers) รองรับอยู่ไม่น้อยกว่าสี่ชั้น ชั้นน้ำเหล่านี้แผ่ขยายตัวรองรับ

อยู่ทั่วทั้งพื้นที่ของที่ราบลุ่ม และมีการวางตัวเอียงเทจากขอบแอ่งเข้าหาใจกลางพื้นที่ที่เป็นที่ลุ่มขนานไปกับแนวของแม่น้ำแม่กลอง ยกเว้นในบริเวณใกล้ขอบแอ่งทางด้านทิศตะวันออกตอนล่าง เขตติดต่อระหว่างจังหวัดสมุทรสงครามและจังหวัดราชบุรี ซึ่งชั้นน้ำเอียงเทไปทางด้านทิศตะวันออก ทางด้านทิศตะวันตกของแอ่งชั้นน้ำตะกอนร่วนวางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง ในขณะที่ทางด้านทิศตะวันออก และด้านทิศใต้ ชั้นน้ำจะต่อเนื่องและสอดคล้องกับชั้นน้ำของกลุ่มแอ่งท่าจีน แต่ชั้นน้ำจะเริ่มเอียงเทไปทางด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งบ่งชี้ว่ามีการแบ่งขอบเขตของแอ่งน้ำใต้ดิน (Groundwater Divide) อย่างไรก็ดีตาม ที่ราบลุ่มทางด้านทิศตะวันออกของแอ่งแม่กลองเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพน้ำใต้ดินสูง และมีความสำคัญต่อการศึกษาระเมินศักยภาพน้ำใต้ดิน ส่วนในพื้นที่ทางด้านทิศตะวันตก มีลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นตะพักทิวเขาและภูเขาโดด มีชั้นน้ำใต้ดินตะกอนหินร่วนบาง ๆ รองรับอยู่ ถัดลงไปมีชั้นน้ำหินแข็ง (Consolidated Aquifers) หน่วยต่าง ๆ รองรับอยู่ที่ระดับตื้น ส่วนบริเวณเนินตะพักทางด้านทิศตะวันตกของแอ่งเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพน้ำใต้ดิน ต่ำ และมีความสำคัญน้อยต่อการศึกษาระเมินศักยภาพน้ำใต้ดิน ลักษณะโดยทั่วไปของชั้นน้ำใต้ดินตะกอนร่วนทางด้านทิศตะวันออกของแอ่งสามารถแบ่งได้เป็น 5 ชั้น ดังต่อไปนี้ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551)

(1) ชั้นน้ำตะกอนน้ำพา (Alluvial Aquifer, Qfd)

ชั้นน้ำตะกอนน้ำพา (Alluvial Aquifer, Qfd) เป็นชั้นน้ำที่ประกอบขึ้นด้วยตะกอนที่ตกทับถมกันในที่ราบน้ำท่วมถึงหรือที่ราบน้ำหลาก (Flood-Plain) ของแม่น้ำแม่กลองในสมัยปัจจุบันแผ่ขยายตัวเป็นแนวยาวแคบ ๆ ขนานไปกับแนวของลำน้ำแม่กลอง ตั้งแต่บริเวณตัวเมืองกาญจนบุรีลงไปจนถึงตัวเมืองราชบุรี มีความยาวประมาณ 60 กิโลเมตร และกว้างโดยเฉลี่ย 10 กิโลเมตร และมีความหนาโดยเฉลี่ย 10-20 เมตร ประกอบไปด้วยชั้นตะกอนพวกกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวที่มีการคัดขนาดดีปานกลาง ชั้นน้ำนี้มีอายุการสะสมตัวในสมัยโฮโลซีนหรือปัจจุบัน (Holocene or Recent Epoch) ซึ่งนับได้ว่าเป็นชั้นน้ำที่มีอายุอ่อนที่สุดของแอ่งแม่กลอง ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาแสดงว่าชั้นน้ำนี้เทียบลำดับชั้นน้ำเดียวกันกับชั้นน้ำกรุงเทพฯ (Bangkok Aquifer) ของแอ่งเจ้าพระยาตอนใต้

(2) ชั้นน้ำตะกอนน้ำพารูปพัดยุคใหม่ (Young Alluvial Fan Aquifer, Qf2)

ชั้นน้ำตะกอนน้ำพารูปพัดยุคใหม่ (Young Alluvial Fan Aquifer, Qf2) ปรากฏตัวอยู่ลักษณะเป็นเนินรูปพัดขนาดใหญ่ทางด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือของแอ่งแม่กลองในเขตพื้นที่อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม และวางตัวรองรับอยู่ใต้ชั้นน้ำตะกอนน้ำพา และถูกปิดทับด้วยดินเหนียวทะเลน้ำกร่อย ทางด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้ของแอ่ง ชั้นน้ำ Qf2 มีความหนาโดยเฉลี่ย 90 เมตร ประกอบไปด้วยชั้นตะกอนกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวสลับกัน ลักษณะเด่นของชั้น Qf2 มักแสดงลักษณะโครงสร้างการวางชั้นกลับขนาด (Coarsening Upward Structure) อย่างต่อเนื่องตลอดลำดับการตกทับถม (Depositional Sequence) ชั้นน้ำตะกอนน้ำพารูปพัดยุคใหม่มีอายุการสะสมตัวในสมัยไพลสโตซีนตอนปลาย (Late Pleistocene Epoch) และสามารถเทียบลำดับชั้นเดียวกันกับตอนล่างของชั้นน้ำกรุงเทพ (Bangkok Aquifer, BK) ของแอ่งเจ้าพระยาตอนใต้

(3) ชั้นน้ำตะกอนน้ำพารูปพัดยุคเก่า (Old Alluvial Fan Aquifer, Qf1)

ชั้นน้ำตะกอนน้ำพารูปพัดยุคเก่า (Old Alluvial Fan Aquifer, Qf1) เป็นชั้นน้ำที่วางตัวรองรับอยู่ใต้ชั้นน้ำตะกอนน้ำพารูปพัดยุคใหม่ แต่ไม่ปรากฏบนผิวดินในแอ่งแม่กลอง มีความหนาเฉลี่ย 70 เมตร ประกอบด้วย ตะกอน ดินเหนียว ทรายแป้ง ทราย และกรวด มีอายุการสะสมตัวในสมัยไพลสโตซีนตอนกลางถึงตอนปลาย (Middle to Late Pleistocene) ซึ่งสามารถเทียบลำดับเดียวกับชั้นน้ำพระประแดง (PD)

(4) ชั้นน้ำตะกอนตะพักระดับกลาง (Middle Terrace Aquifer, Qt2)

ชั้นน้ำตะกอนตะพักระดับกลาง (Middle Terrace Aquifer, Qt2) วางตัวรองรับอยู่ใต้ชั้นน้ำตะกอนน้ำพา (Qfd) เป็นแนวยาวแคบ ๆ กว้างโดยเฉลี่ย 5 กิโลเมตร ทางด้านทิศตะวันตกของแอ่งแม่กลอง ถัดจากที่ราบน้ำท่วมถึงไปทางด้านทิศตะวันตกจนจรดแนวของตะพักระดับสูงมีความหนาโดยเฉลี่ย 100 เมตร ประกอบไปด้วย ชั้นตะกอนกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวสลับกัน มีอายุการสะสมตัวในสมัยไพลสโตซีนตอนกลาง (Middle Pleistocene Epoch) เป็นชั้นน้ำที่มีอายุเทียบลำดับกับชั้นน้ำนครหลวง (Nakhon Luang Aquifer, NL) ของแอ่งเจ้าพระยาตอนใต้

(5) ชั้นน้ำตะกอนตะพักระดับสูง (High Terrace Aquifer, Qt1)

ชั้นน้ำตะกอนตะพักระดับสูง (High Terrace Aquifer, Qt1) เป็นชั้นน้ำที่วางตัวอยู่ใต้ชั้นน้ำตะกอนตะพักระดับต่ำ (Qt2) ปรากฏอยู่ทางด้านทิศตะวันตกของแอ่งแม่กลองมีความหนาโดยเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 100 เมตร แต่ในบริเวณมีภูเขาโตดจะบางกว่า เนื่องจากมีหินแข็งรองรับอยู่ชั้น ประกอบด้วย ตะกอนกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวสลับกัน มีอายุการสะสมตัวในสมัยสมัยไพลโอซีน-สมัยไพลสโตซีนตอนต้น (Pliocene–Early Pleistocene Epoch) สามารถเทียบลำดับได้กับชั้นน้ำนนทบุรี (Nonthaburi Aquifer, NB) ของแอ่งเจ้าพระยาตอนใต้

บทที่ 2 เนื้อเรื่อง

2.1 ผลการรวบรวมข้อมูลวิจัย

ข้อมูลวิจัยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยาซึ่งเป็นข้อมูลทุติยภูมิที่รวบรวมได้จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล กรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลตรวจวัดน้ำใต้ดินภาคสนาม รวมทั้งทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการดังสรุปรายละเอียดที่สำคัญไว้ในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สรุปรายละเอียดที่สำคัญของข้อมูลวิจัย

กลุ่มข้อมูล	ประเภทข้อมูล	ลักษณะข้อมูล	จำนวนสถานี
ข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยา	ข้อมูลสถิติภูมิอากาศ	รายคาบ 10-30 ปี	4
	ข้อมูลฝน	รายวัน	58
ข้อมูลน้ำใต้ดิน	ข้อมูลบ่อสูบน้ำใต้ดิน	ข้อมูลทุติยภูมิ	546
	ข้อมูลบ่อสังเกตการณ์	ข้อมูลทุติยภูมิ	22
ข้อมูลตรวจวัดน้ำใต้ดิน	ข้อมูลอัตราการซึมของน้ำ	ข้อมูลตรวจวัดภาคสนาม	3
	ข้อมูลพารามิเตอร์ดินที่เกี่ยวข้อง	ข้อมูลตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ	—

2.2 ผลการวิเคราะห์ฐานข้อมูลน้ำใต้ดิน

2.2.1 สถานภาพน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำใต้ดินในกลุ่มน้ำแม่กลอง

จากการศึกษาโครงการจัดทำแผนบูรณาการน้ำบาดาลร่วมกับน้ำผิวดินทั่วประเทศ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2554ก) และโครงการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองและลุ่มน้ำท่าจีนของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551) พบว่าในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองมีการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้ทั้งภาคเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม และภาคครัวเรือนดังแสดงในภาพที่ 2-1 และจากฐานข้อมูลน้ำใต้ดินของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองพบว่า มีการสูบน้ำใต้ดินไปใช้เพื่อการเกษตรกรรมทั้งในเขตพื้นที่ชลประทานของโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่และนอกเขตชลประทานโดยเฉพาะแถบจังหวัดกาญจนบุรี นครปฐม ราชบุรี สุพรรณบุรี สมุทรสาคร และสมุทรสงคราม โดยคุณภาพน้ำจัดอยู่ในประเภทน้ำจืดที่สามารถนำไปใช้ได้



ภาพที่ 2-1 การใช้น้ำใต้ดินเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่

จากรายงานข้างต้นพบว่าจำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินครอบคลุมจังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี นครปฐม สมุทรสาคร และสมุทรสงครามซึ่งตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองมีจำนวนทั้งสิ้น 34,453 บ่อ โดยแบ่งออกเป็นบ่อสูบน้ำใต้ดินส่วนตัวที่ใช้การได้เพื่อการอุปโภคบริโภคและเพื่อการเกษตรกรรมจำนวน 26,079 บ่อ บ่อสูบน้ำใต้ดินสาธารณะจำนวน 5,253 บ่อ และบ่อสูบน้ำใต้ดินที่พัฒนาเป็นระบบประปาชนบทจำนวน 3,121 แห่ง และมีผู้ใช้น้ำจากระบบประปาชนบทจำนวนทั้งสิ้น 1,801,731 รายในอัตรา 120 ลิตร ต่อคนต่อวัน ดังแสดงในตารางที่ 2-2 ซึ่งในจำนวนนี้เป็นบ่อสูบน้ำใต้ดินที่ขออนุญาตใช้ตามพระราชบัญญัติ น้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2550 จำนวน 2,742 บ่อดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-2 จำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินครอบคลุมจังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี นครปฐม สมุทรสาคร และสมุทรสงครามในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง

จังหวัด	บ่อสูบน้ำใต้ดิน ส่วนตัวใช้การได้ (บ่อ)	บ่อสูบน้ำใต้ดิน สาธารณะ (บ่อ)	บ่อประปา ชนบท (แห่ง)	ผู้ใช้น้ำ (คน)	ปริมาณการใช้น้ำ (ลบ.ม./วัน)
กาญจนบุรี	18,881	1,619	344	194,892	21,650
ราชบุรี	3,705	1,248	723	524,571	66,115
นครปฐม	3,080	1,724	1284	636,693	113,899
สมุทรสาคร	263	399	595	310890	37,120
สมุทรสงคราม	150	263	175	134,685	23,143
รวม	26,079	5,253	3,121	1,801,731	261,927

ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2551)

ตารางที่ 2-3 จำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินครอบคลุมจังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี นครปฐม สมุทรสาคร และสมุทรสงครามในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองที่ขออนุญาตใช้ตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาล

จังหวัด	จำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดิน (บ่อ) และปริมาณการใช้น้ำใต้ดิน (ลบ.ม./วัน)							
	อุปโภคบริโภค		อุตสาหกรรม		เกษตรกรรม		รวม	
	จำนวน	ปริมาณน้ำ	จำนวน	ปริมาณน้ำ	จำนวน	ปริมาณน้ำ	จำนวน	ปริมาณน้ำ
กาญจนบุรี	28	1,408	90	68,815	30	2,186	148	72,409
ราชบุรี	94	12,589	301	143,234	100	8,702	495	164,525
นครปฐม	160	22,687	612	132,612	24	886	796	156,185
สมุทรสาคร	166	25,330	823	238,974	2	65	991	265,295
สมุทรสงคราม	176	1,247	127	4,089	9	406	312	5,742
รวม	624	63,261	1,953	587,724	165	12,245	2,742	664,156

ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2551)

ในขณะที่จำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินเฉพาะในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่จากฐานข้อมูลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลมีทั้งสิ้น 3,556 บ่อ และจำนวนบ่อสังเกตการณ์มีทั้งสิ้น 51 บ่อ โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

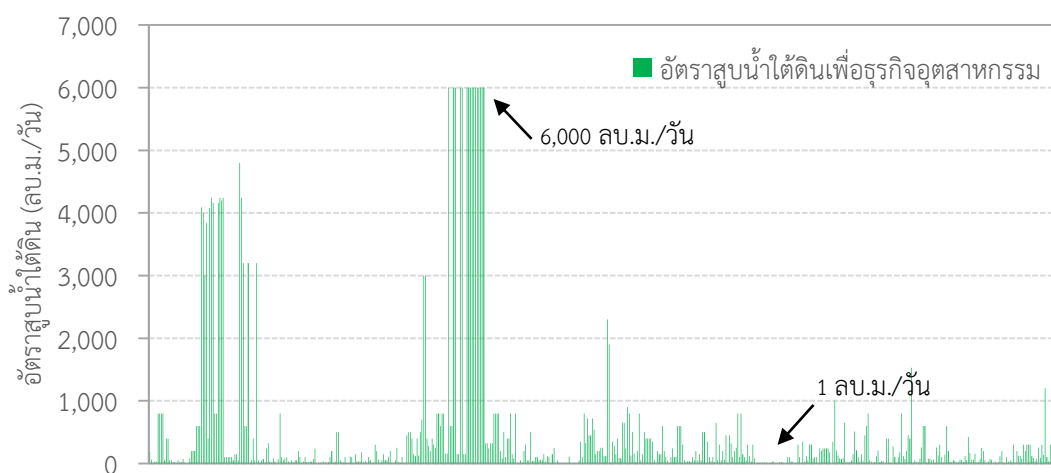
2.2.1.1 ข้อมูลน้ำใต้ดินจากบ่อสูบ (Pumping Wells Data)

ข้อมูลน้ำใต้ดินบ่อสูบน้ำใต้ดิน (Pumping Wells Data) ที่รวบรวมได้จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่มีทั้งสิ้น 3,556 บ่อ ดังแสดงในตารางที่ 2-4 ประกอบด้วย บ่อสูบน้ำใต้ดินของรัฐ (Government Wells) จำนวน 2,706 บ่อ ตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2443-2556 โดยสูบน้ำใต้ดินมาใช้เฉลี่ย 16 ชั่วโมงต่อวัน หรือคิดเป็นอัตราการสูบน้ำจากบ่อเฉลี่ย 251.54 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน รวมอัตราการสูบน้ำจากบ่อสูบน้ำใต้ดินของรัฐทั้งหมด 248.44 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และบ่อสูบน้ำใต้ดินของเอกชน (Private Wells) มีจำนวน 850 บ่อ ตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2455-2557 โดยสูบน้ำใต้ดินมาใช้ตลอด 24 ชั่วโมงต่อวัน หรือคิดเป็นอัตราการสูบน้ำจากบ่อ 320.67 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน รวมอัตราการสูบน้ำจากบ่อสูบน้ำใต้ดินของเอกชนทั้งหมด 93.90 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณการสูบน้ำใต้ดินไปใช้เท่ากับ 342.35 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

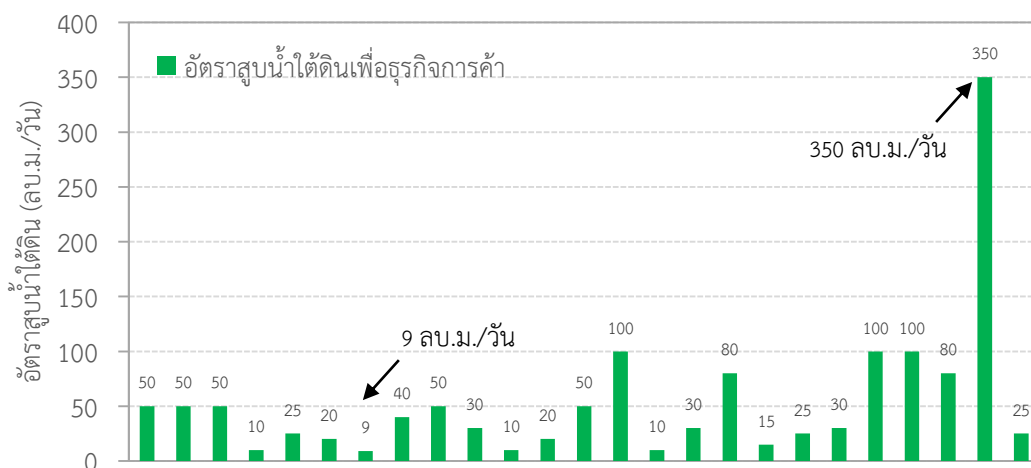
ตารางที่ 2-4 จำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่

บ่อสูบน้ำใต้ดิน	จำนวน (บ่อ)	อัตราการสูบน้ำเฉลี่ย (ลบ.ม./วัน)	ปริมาณการสูบน้ำใต้ดิน เฉลี่ย (ชั่วโมงต่อวัน)
บ่อสูบน้ำใต้ดินของรัฐ	2,706	251.54	16
บ่อสูบน้ำใต้ดินของเอกชน	850	320.67	24
รวม	3,556	572.21	-

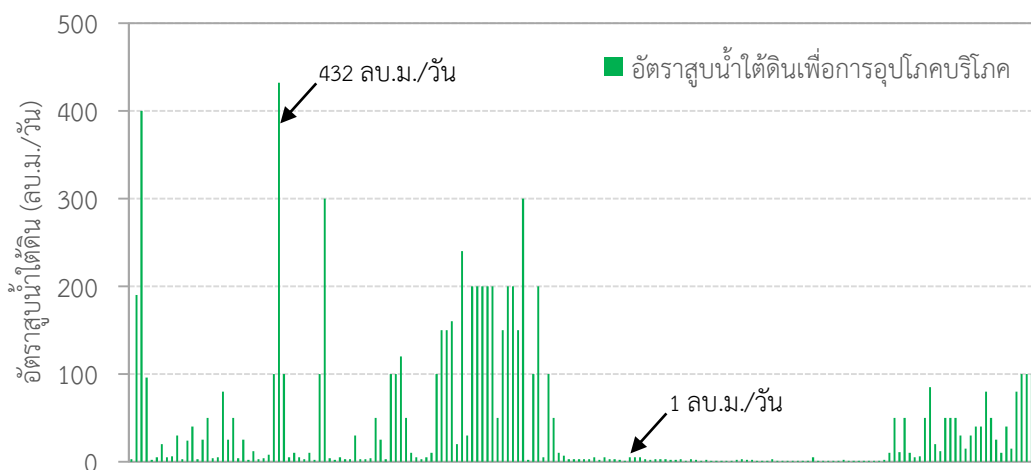
น้ำใต้ดินถูกนำมาใช้ใน 6 กิจกรรมหลัก ได้แก่ (1) ธุรกิจอุตสาหกรรม อัตราการสูบน้ำอยู่ระหว่าง 1–6,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (2) ธุรกิจการค้า อัตราการสูบน้ำอยู่ระหว่าง 9–350 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (3) ธุรกิจบริการ อัตราการสูบน้ำอยู่ระหว่าง 2–300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (4) เกษตรกรรมเพาะปลูก อัตราการสูบน้ำอยู่ระหว่าง 5–200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (5) ปศุสัตว์ อัตราการสูบน้ำอยู่ระหว่าง 5–250 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และ (6) การอุปโภคบริโภค อัตราการสูบน้ำอยู่ระหว่าง 1–432 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ถึงภาพที่ 2-7 โดยส่วนใหญ่ใช้สำหรับธุรกิจอุตสาหกรรมคิดเป็นปริมาณ 55% ของบ่อสูบน้ำเอกชนทั้งหมด



ภาพที่ 2-2 อัตราการสูบน้ำใต้ดินเพื่อธุรกิจอุตสาหกรรม

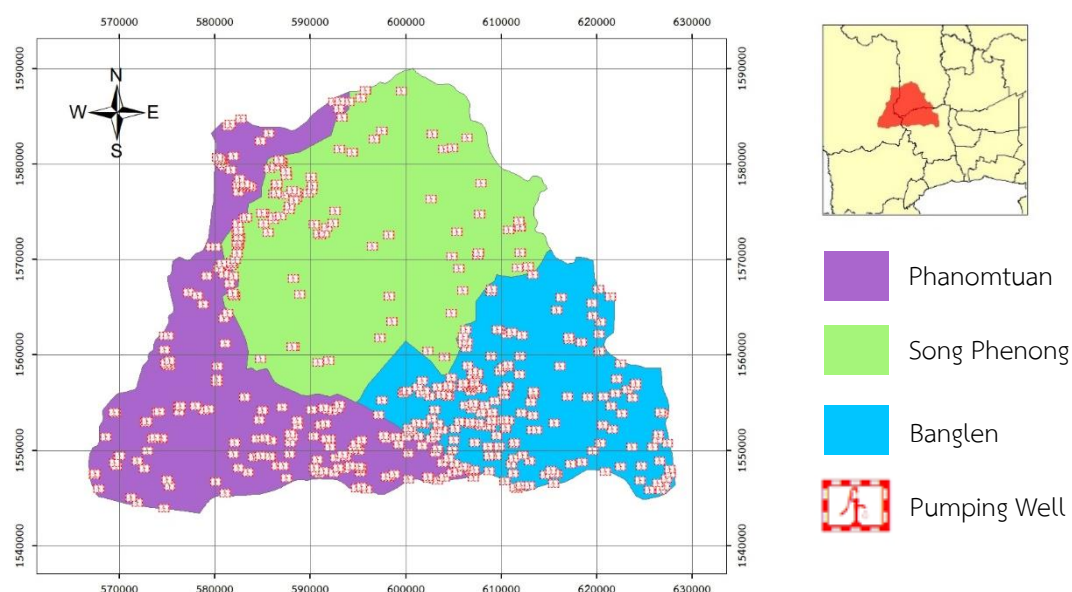


ภาพที่ 2-3 อัตราการสูบน้ำใต้ดินเพื่อธุรกิจการค้า

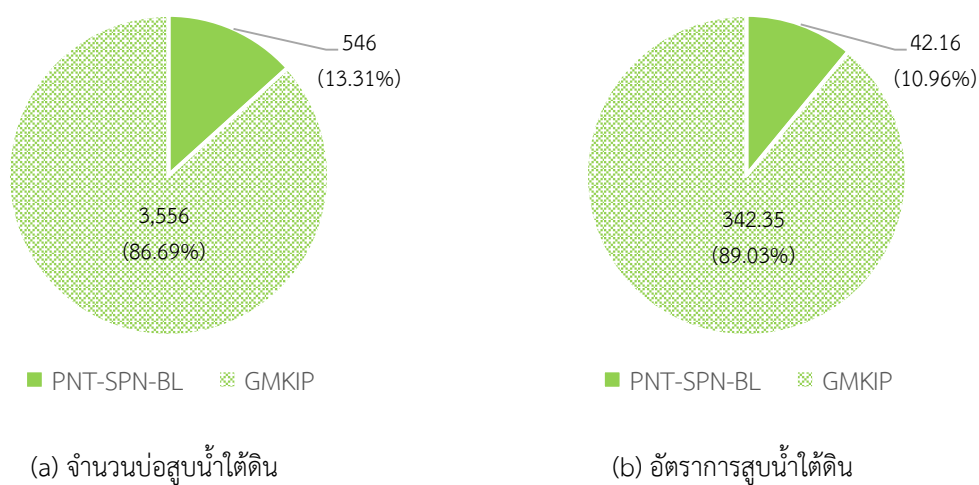


ภาพที่ 2-7 อัตราการสูบน้ำใต้ดินเพื่อการอุปโภคบริโภค

สำหรับข้อมูลจำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินเฉพาะในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559 พบว่า มีทั้งสิ้น 546 บ่อ หรือคิดเป็น 13.31% ของจำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ดังแสดงในภาพที่ 2-8 และภาพที่ 2-9 ประกอบด้วย บ่อสูบน้ำใต้ดินของรัฐ จำนวน 532 บ่อ ตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2443-2556 โดยสูบน้ำใต้ดินมาใช้เฉลี่ย 16 ชั่วโมงต่อวัน หรือคิดเป็นอัตราการสูบน้ำจากบ่อเฉลี่ย 215 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน รวมอัตราการสูบน้ำจากบ่อสูบน้ำใต้ดินของรัฐทั้งหมด 41.76 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และบ่อสูบน้ำใต้ดินของเอกชนมีจำนวน 14 บ่อ ตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2455-2557 โดยสูบน้ำใต้ดินมาใช้ตลอด 24 ชั่วโมงต่อวัน หรือคิดเป็นอัตราการสูบน้ำจากบ่อ 78.20 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน รวมอัตราการสูบน้ำจากบ่อสูบน้ำใต้ดินของเอกชนทั้งหมด 0.40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณการสูบน้ำใต้ดินไปใช้เท่ากับ 42.16 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี



ภาพที่ 2-8 การกระจายตัวของบ่อสูบน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน



ภาพที่ 2-9 เปรียบเทียบจำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินและอัตราการสูบน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่และพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน

2.2.1.2 ข้อมูลน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ (Observation Wells Data)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลระดับน้ำใต้ดินของบ่อสังเกตการณ์ (Observation Wells Data) ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลซึ่งตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559 ในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่มีจำนวน 52 บ่อ ดังแสดงในตารางที่ 2-5 โดยมีระดับความลึกเฉลี่ยของบ่อสังเกตการณ์ประมาณ 150 เมตร โดยบ่อที่ลึกที่สุดมีความลึกอยู่ที่ 320 เมตร พบว่า ระดับน้ำใต้ดินของบ่อสังเกตการณ์ผันแปรแตกต่างกันตามปัจจัยการเติมน้ำในแต่ละฤดูดังแสดงในภาพที่ 2-10 ผลการวิเคราะห์

ความแตกต่างของระดับน้ำใต้ดินในช่วงฤดูฝน (ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม-ธันวาคม) และฤดูแล้ง (ตั้งแต่เดือนมกราคม-มิถุนายน) จากบ่อสังเกตการณ์ทั้งหมดในพื้นที่ศึกษาพบว่า 70.36% ของบ่อสังเกตการณ์ทั้งหมดมีค่าระดับน้ำใต้ดินเฉลี่ยในช่วงฤดูฝนสูงกว่าระดับน้ำใต้ดินเฉลี่ยในช่วงฤดูแล้งในช่วงระหว่าง 0.03-4.80 เมตร อันเนื่องมาจากการเติมน้ำใต้ดินในช่วงฤดูฝนที่เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่อีก 25.64% ของบ่อสังเกตการณ์ทั้งหมดมีค่าระดับน้ำใต้ดินเฉลี่ยในช่วงฤดูฝนต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินเฉลี่ยในช่วงฤดูแล้งอยู่เล็กน้อยในช่วงระหว่าง (-0.09)-(-1.70) เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2-11

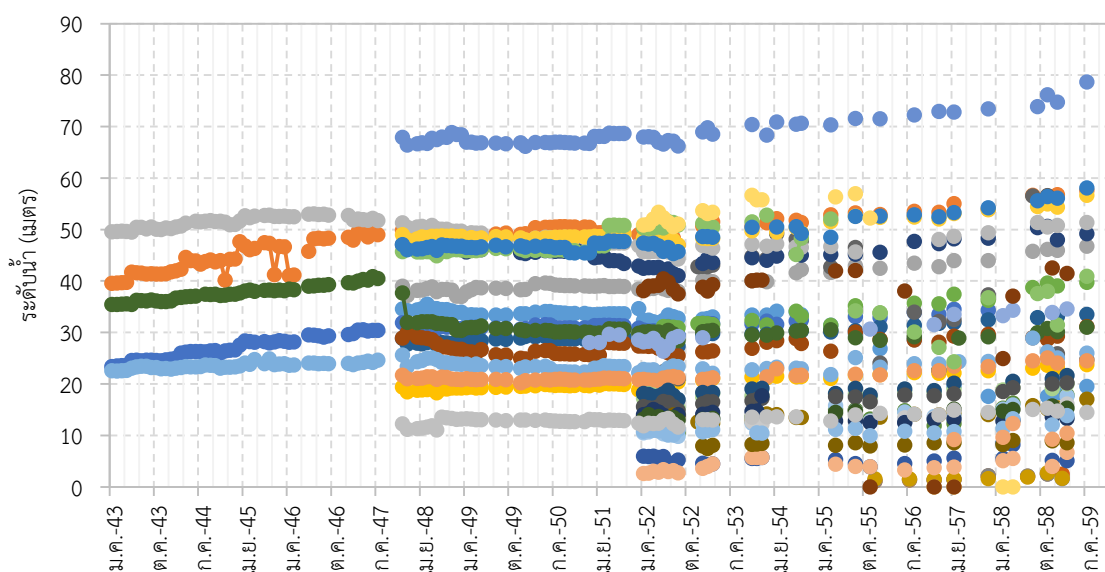
ตารางที่ 2-5 รายละเอียดที่ตั้งของบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่

ลำดับ	พิกัด		สถานี	เลขที่บ่อ	ที่ตั้ง
	ตะวันออก	เหนือ			
1	616942	1518972	CT151/4	NL0100	วัดดอนยายหอม อ.เมือง จ.นครปฐม
2	618097	1528536	CT114/3	NB0090	วัดไร่เกาเต้านำโรง อ.เมือง จ.นครปฐม
3	611275	1530612	CT158/2	NB0123	วัดวังตะกั่ว อ.เมือง จ.นครปฐม
4	601999	1538751	CT154/1	PT0012	วัดหนองงูเหลือม อ.เมือง จ.นครปฐม
5	607135	1525309	CT115/3	NB0091	วัดหนองดินแดง อ.เมือง จ.นครปฐม
6*	606031	1561216	CT152/2	NL0099	วัดทะเลบก อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
7*	622290	1540233	CT156/2	SK0008	วัดดอนพุทรา อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
8*	609053	1553160	CT155/3	PD0115	วัดดอนเตาอิฐ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
9	628116	1526588	CT150/1	SK0003	วัดแค อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม
10	628990	1535070	CT113/2	NL0090	วัดละมุด อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม
11*	625804	1550379	CT116/2	NL0094	ที่ว่าการอำเภอบางเลน อ.บางเลน จ.นครปฐม
12*	620508	1560845	CT153/2	NL0104	วัดบางหลวง อ.บางเลน จ.นครปฐม
13	625821	1516291	CT111/2	NB0087	วัดวังน้ำขาว อ.สามพราน จ.นครปฐม
14	623219	1508606	CT162/3	PT0017	วัดเจ็ดริ้ว อ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร
15	621463	1497147	CT163/3	NB0106	วัดยกระบัตร์ อ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร
16	617510	1506980	CT164/5	PT0026	วัดรางต้นนิลประดิษฐ์ อ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร
17	614819	1505176	CT165/5	SK0024	วัดหนองสองห้อง อ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร
18*	610945	1550038	CWE88/2	CT882	อบต.ดอนข่อย อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
19*	592075	1551232	CWE87/1	CT871	วัดสี่แยกเจริญพร อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
20*	602381	1547294	CWE86/2	CT862	วัดกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
21*	589022	1566460	CWE117/1	NA	วัดหนองกระดี่ อ.สองพี่น้อง จ.สุพรรณบุรี
22*	588896	1566424	CWE117/2	NA	วัดหนองกระดี่ อ.สองพี่น้อง จ.สุพรรณบุรี
23	596723	1582692	CWE121/1	NA	วัดใหม่สิทธิवास อ.อุทัย จ.สุพรรณบุรี
24	571874	1548812	CWE102/2	CWE1022	วัดกว้างทองราษฎร์บูรณะ อ.ท่าม่วง จ.กาญจนบุรี
25	593553	1543998	CWE103/1	CWE10311	ที่สาธารณะอ้อกระทุ้ง อ.ท่ามะกา จ.กาญจนบุรี
26	593556	1544013	CWE103/2	CWE10312	ที่สาธารณะอ้อกระทุ้ง อ.ท่ามะกา จ.กาญจนบุรี
27	593551	1544015	CWE103/3	CWE10313	ที่สาธารณะอ้อกระทุ้ง อ.ท่ามะกา จ.กาญจนบุรี
28	582346	1537409	CWE104/1	CWE1041	วัดห้วยเหนียว อ.ท่ามะกา จ.กาญจนบุรี
29	604300	1502850	CWE91/2	CWE912	วัดโคกบำรุงราษฎร์ อ.ดำเนินสะดวก จ.ราชบุรี

ตารางที่ 2-5 (ต่อ)

ลำดับ	พิกัด		สถานี	เลขที่บ่อ	ที่ตั้ง
	ตะวันออก	เหนือ			
30	599819	1497539	CWE85/2	RB05	โรงเรียนเนกขัมวิทยา อ.ดำเนินสะดวก จ.ราชบุรี
31	591231	1522492	CWE92/1	CWE921	วัดม่วง อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี
32	588284	1531921	CWE93/1	CWE931	วัดรางวาลย์ อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี
33	607277	1510326	CWE94/2	CWE942	หน้าวัดดอนมะขามเทศ อ.บางแพ จ.ราชบุรี
34	592294	1507280	CWE96/2	CWE962	วัดดอนทราย อ.โพธาราม จ.ราชบุรี
35	592956	1493783	CWE97/2	CWE972	วัดบางศรีเพชร อ.เมือง จ.ราชบุรี
36	595589	1487320	CWE99/1	CWE973	เทศบาลตำบลวัดเพลง อ.วัดเพลง จ.ราชบุรี
37	596050	1487210	CWE99/3	CWE975	เทศบาลตำบลวัดเพลง อ.วัดเพลง จ.ราชบุรี
38	583375	1515848	CWE98/1	CWE981	ศูนย์ทรัพยากรน้ำบาดาลภาค 10 อ.โพธาราม จ.ราชบุรี
39	578958	1500827	NA	560B030	สำนักทรัพยากรน้ำบาดาลเขต 8 อ.เมือง จ.ราชบุรี
40*	606031	1561216	CT152/1	NB0096	วัดทะเลบก อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
41*	610945	1550038	CWE88/1	CT881	อบต.ดอนข่อย อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
42	610945	1550038	CWE88/2	CT882	อบต.ดอนข่อย อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
43*	610945	1550038	CWE88/3	CT883	อบต.ดอนข่อย อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
44*	609053	1553160	CT155/1	NB0108	วัดดอนเตาอิฐ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
45*	609053	1553160	CT155/2	NL0115	วัดดอนเตาอิฐ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
46*	592075	1551232	CWE87/2	CT872	วัดสี่แยกเจริญพร อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
47*	602381	1547294	CWE86/1	CT861	วัดกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
48*	625804	1550379	CT116/1	PD0093	ที่ว่าการอำเภอบางเลน อ.บางเลน จ.นครปฐม
49*	625804	1550379	CT116/3	NB0092	ที่ว่าการอำเภอบางเลน อ.บางเลน จ.นครปฐม
50*	620508	1560845	NA	PD0106	วัดบางหลวง อ.บางเลน จ.นครปฐม
51*	596723	1582692	CWE121/2	NA	วัดใหม่สิทธิवास อ.อู่ทอง จ.สุพรรณบุรี
52*	571874	1548812	CWE102/1	CWE1021	วัดกร่างทองราษฎร์บูรณะ อ.ท่าม่วง จ.กาญจนบุรี

หมายเหตุ : * บ่อสังเกตการณ์ที่ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน

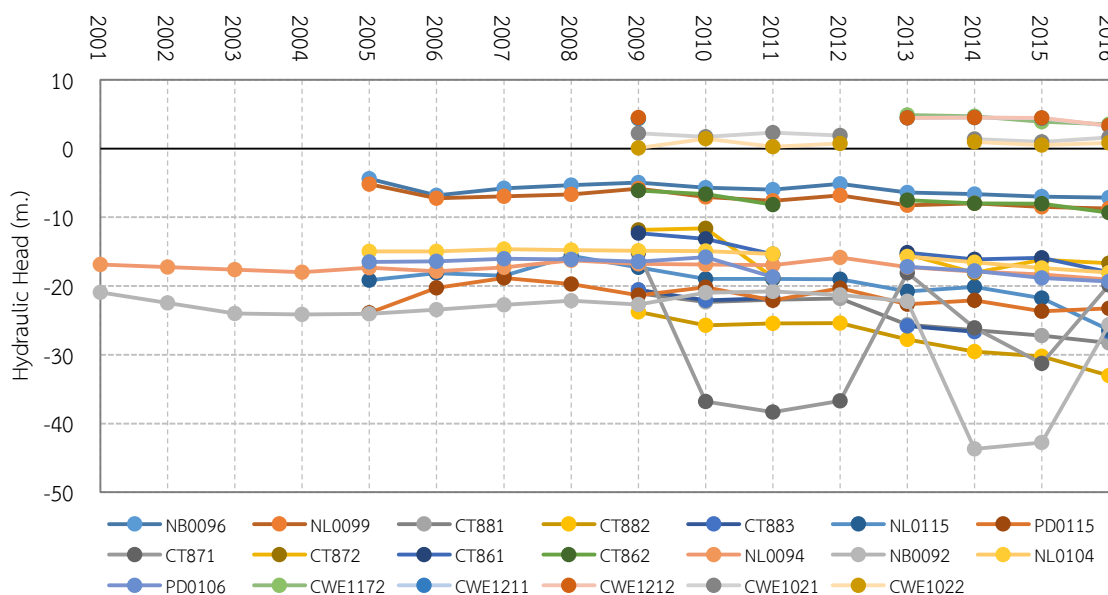


ภาพที่ 2-10 ระดับน้ำใต้ดินของบ่อสังเกตการณ์ตรวจวัดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559



ภาพที่ 2-11 ความแตกต่างของระดับน้ำใต้ดินในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งจากบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่

จากการวิเคราะห์ข้อมูลระดับน้ำใต้ดินของบ่อสังเกตการณ์ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล เฉพาะในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559 พบว่า มีจำนวน 20 บ่อ โดยมีระดับความลึกเฉลี่ยของบ่อสังเกตการณ์ประมาณ 129 เมตร โดยบ่อที่ลึกที่สุดมีความลึกอยู่ที่ 218 เมตร ในทำนองเดียวกัน โดยส่วนใหญ่ระดับน้ำใต้ดินของบ่อสังเกตการณ์ผันแปรแตกต่างกันระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝนตามปริมาณการเติมน้ำที่มีค่อนข้างสูงกว่าในช่วงฤดูฝนอันเนื่องมาจากปัจจัยฝน ยิ่งไปกว่านั้น จากผลการวิเคราะห์ระดับน้ำใต้ดินรายปีของบ่อสังเกตการณ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559 พบว่า ระดับน้ำมีแนวโน้มลดลงเป็นส่วนใหญ่ดังแสดงในภาพที่ 2-12



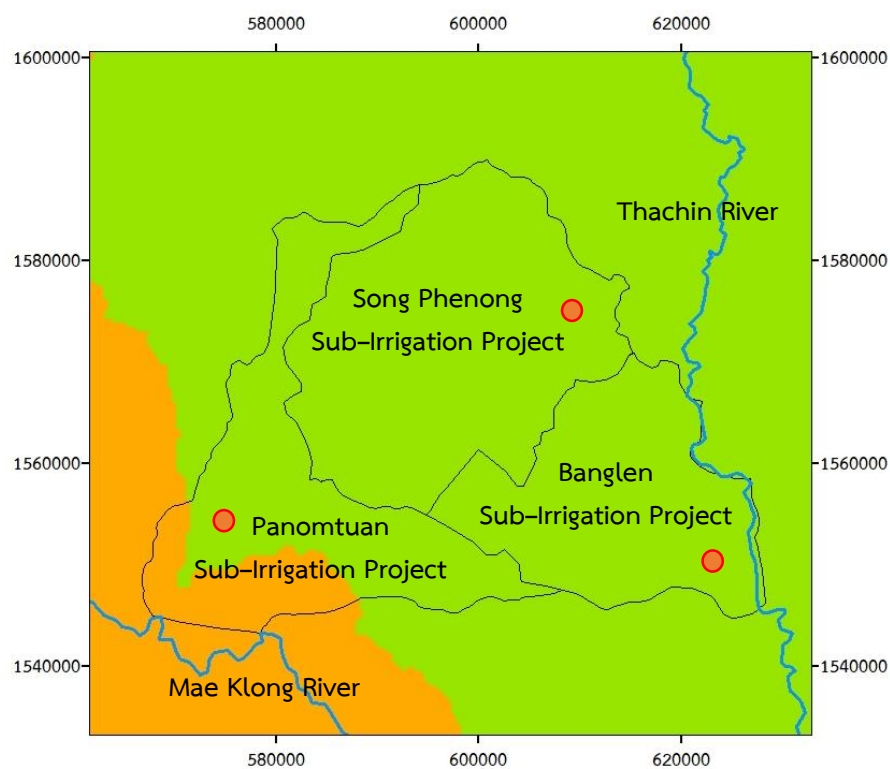
ภาพที่ 2-12 ระดับน้ำใต้ดินรายปีของบ่อสังเกตการณ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559

2.3 ผลการเก็บตัวอย่างดินและการตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำภาคสนาม และผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดินในห้องปฏิบัติการ

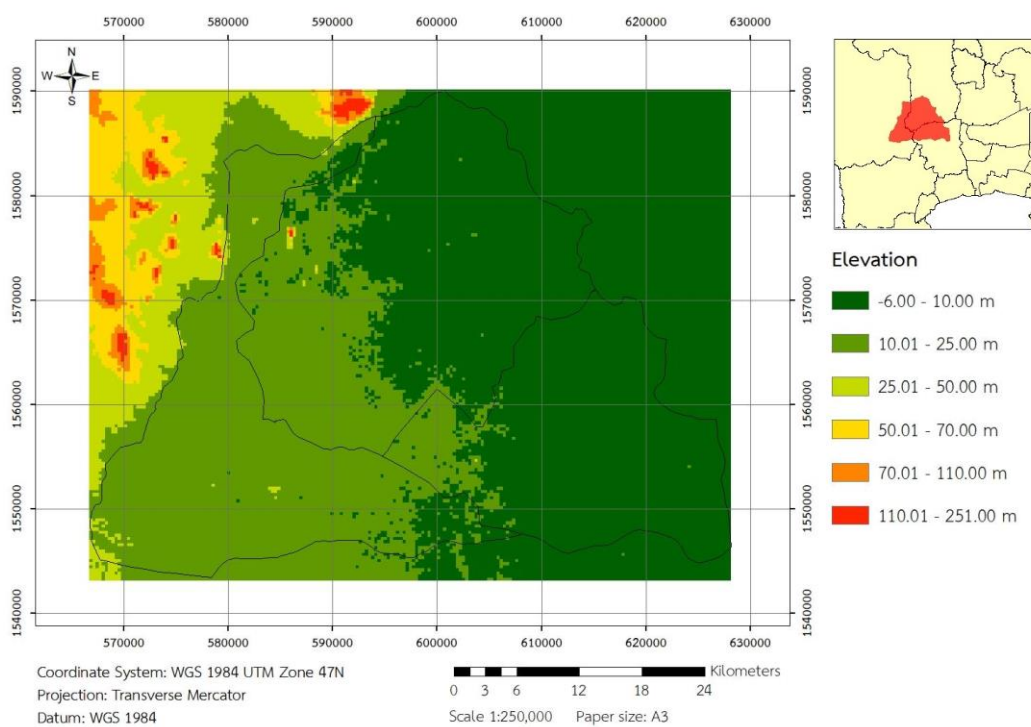
งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการเก็บรวบรวมข้อมูลตรวจวัดน้ำใต้ดินภาคสนามและเก็บข้อมูลตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์หาข้อมูลพารามิเตอร์ดินในห้องปฏิบัติการสำหรับใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าในการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge Model) ในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน รายละเอียดที่สำคัญมีดังนี้

2.3.1 การเก็บข้อมูลตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ซึ่งครอบคลุมพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน จำนวนกว่า 1,098,600 ไร่ ในเขตจังหวัดกาญจนบุรี สุพรรณบุรี และนครปฐม ภายใต้ความดูแลของสำนักชลประทานที่ 13 กรมชลประทาน โดยโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวนมีขนาดพื้นที่ 355,400 ไร่ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้องมีขนาดพื้นที่ 370,900 ไร่ และโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบางเลน 372,300 ไร่ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2-13 พื้นที่ที่มีลักษณะความลาดชันสูงจากทางทิศตะวันตกในเขตพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวนที่มีระดับความสูงอยู่ในช่วงระหว่าง 25 ถึง 50 เมตร รทก. และค่อย ๆ ลาดเตลงมาในเขตพื้นที่โครงการส่งน้ำโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้องและโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบางเลนทางทิศตะวันออกซึ่งมีระดับความสูงอยู่ในช่วง (-5) ถึง 25 เมตร รทก. ดังแสดงในภาพที่ 2-14 ซึ่งรายละเอียดของลักษณะโครงการที่สำคัญได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-6



ภาพที่ 2-13 ตำแหน่งและจุดเก็บข้อมูลตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษา

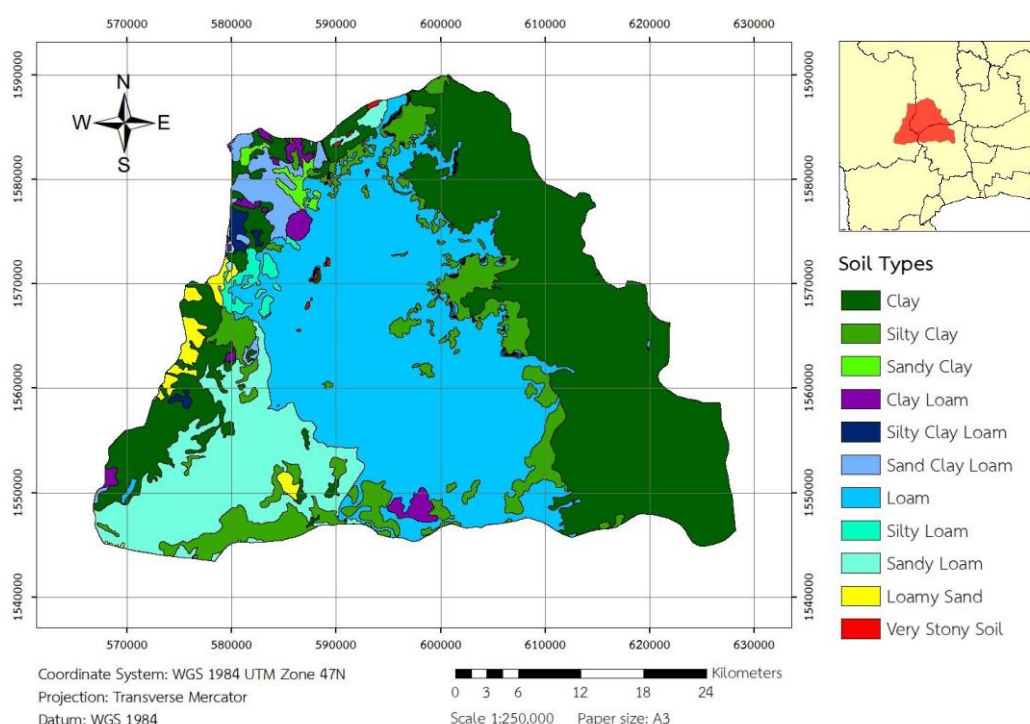


ภาพที่ 2-14 ระดับความสูงของพื้นที่ในพื้นที่ศึกษา

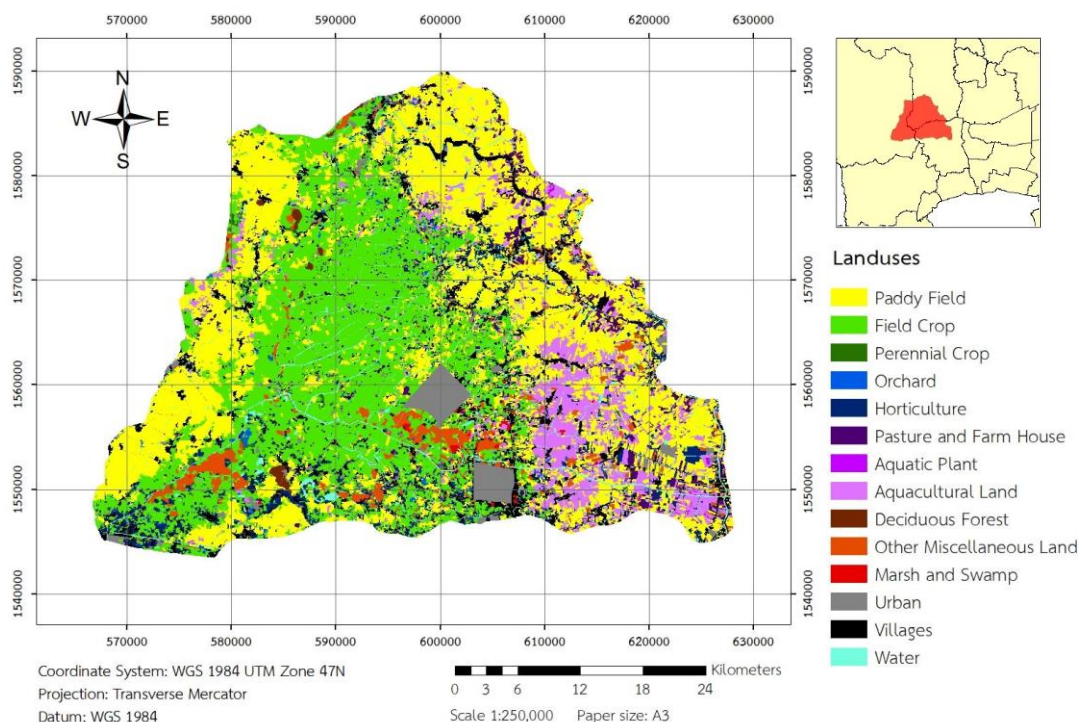
ตารางที่ 2-6 ข้อมูลลักษณะโครงการที่สำคัญ

พื้นที่ศึกษา	ขนาดพื้นที่ (ไร่)	ระดับความสูง (เมตร รทก.)
โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน	355,400	25 ถึง 50
โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้อง	370,900	-6 ถึง 25
โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบางเลน	372,300	-6 ถึง 25
รวม	1,098,600	—

ผลจากการจำแนกข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินพบว่า 34.96% เป็นพื้นที่นาข้าว 30.03% เป็นพื้นที่ปลูกพืชไร่ ได้แก่ อ้อยและข้าวโพดเป็นหลัก และ 33.81% ปลูกพืชผักสวนครัวและอื่น ๆ ดังภาพที่ 2-15 นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลประเภทของดินในพื้นที่ศึกษาพบว่า 34.96% เป็นดินเหนียว 34.58% เป็นดินร่วน 11.93% เป็นดินร่วนปนทราย และที่เหลือเป็นดินประเภทอื่น ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2-16 ด้วยเหตุนี้ จึงได้ทำการเก็บข้อมูลตัวอย่างดิน 3 จุด ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 0.00–1.50 เมตร ใน 3 พื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาซึ่งครอบคลุมดินทั้ง 3 ประเภทใน 3 กิจกรรมการปลูกพืชหลัก ได้แก่ ดินเหนียวซึ่งทำการเพาะปลูกข้าวเป็นหลัก ดินร่วนที่เพาะปลูกพืชไร่ และดินร่วนปนทรายที่เพาะปลูกพืชผักสวนครัว โดยรายละเอียดของตำแหน่งและจุดเก็บข้อมูลตัวอย่างดินได้สรุปไว้ในตารางที่ 2-7



ภาพที่ 2-15 การจำแนกชนิดดินในพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 2-16 การจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 2-7 ตำแหน่งและจุดเก็บข้อมูลตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดิน	ชนิดดิน	ชนิดพืช	จุดพิกัด		สถานที่
			X	Y	
A	ดินเหนียว	นาข้าว	613,206	1,578,020	ต.บางพลับ อ.สองพี่น้อง จ.สุพรรณบุรี
B	ดินร่วน	พืชไร่ (อ้อย)	606,261	1,553,926	ต.ทุ่งบัว อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม
C	ดินร่วนปนทราย	พืชผักสวนครัว	569,544	1,547,866	ต.ทุ่งทอง อ.เมือง จ.กาญจนบุรี

การเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษาเพื่อนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ดินในห้องปฏิบัติการนั้นจัดเก็บทั้งในลักษณะตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) และลักษณะดินที่เปลี่ยนแปลงสภาพ (Disturbed Sample) ประกอบด้วย 3 กลุ่มตัวอย่างดิน ได้แก่ (1) ตัวอย่างดิน A (ดินเหนียว) (2) ตัวอย่างดิน B (ดินร่วน) และ (3) ตัวอย่างดิน C (ดินร่วนปนทราย) โดยเก็บที่ระดับความลึกตั้งแต่ระดับผิวน้ำดิน 0.00 เมตร ลึกลงไปถึงระดับ 1.50 เมตร จำนวน 3 ช่วงความลึกดิน ได้แก่ (1) 0.00–0.50 เมตร (2) 0.50–1.00 เมตร และ (3) 1.00–1.50 เมตร อย่างไรก็ตาม จากข้อจำกัดของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างดินทำให้นักวิจัยสามารถเก็บตัวอย่างดินได้บางช่วงความลึกดังสรุปไว้ในตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-8 การเก็บข้อมูลตัวอย่างดินและลักษณะดิน

ตัวอย่างดิน	ความลึกดิน (เมตร)	สีดิน	ลักษณะดิน	ชนิดดินจัดแบ่งโดย กรมพัฒนาที่ดิน
A	0.00–0.50	สีเทาเข้ม	ดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ดินแน่นและค่อนข้างแข็ง	ดินเหนียว
	0.50–1.00	สีเทาอ่อนและปนสีเหลืองบางส่วน	ดินมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยเนื้อดินมีสีเทาอ่อนเป็นหลัก แทรกด้วยดินที่มีสีเหลือง เนื้อดินโดยรวมค่อนข้างแน่น และแข็ง คล้ายคลึงกับตัวอย่างดิน A (0.00–0.50)	ดินเหนียว
	1.00–1.50	สีเทาเข้ม	ดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันคล้ายคลึงกับตัวอย่างดิน A (0.00–0.50) เป็นอย่างมาก แต่เนื้อดินมีความอ่อนนุ่มกว่ามาก ไม่สามารถคงรูปได้ แม้ถูกแรงกระทำเพียงเล็กน้อย	ดินเหนียว
B	0.50–1.00	สีน้ำตาล	ดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเนื้อดินแน่น และมีความแข็งมากที่สุด ในตัวอย่างดินทั้งหมด	ดินร่วน
C	0.00–0.50	สีน้ำตาลเข้ม	ดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเนื้อดินแน่น และมีความแข็งค่อนข้างมาก และมากกว่าตัวอย่างดิน A	ดินร่วนปนทราย
	0.50–1.00	สีน้ำตาลเข้ม	ดินโดยรวมมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างดิน C (0.00–0.50) เพียงแต่มีความหลวมกว่าเล็กน้อย	ดินร่วนปนทราย

จุดเก็บตัวอย่างดินทั้ง 3 จุดที่เป็นตัวแทนพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาทั้ง 3 โครงการ และชนิดของดินทั้ง 3 ชนิด แสดงไว้ในภาพที่ 2-17



(a) จุดเก็บตัวอย่างดิน A ในพื้นที่ ต.บางพลับ อ.สองพี่น้อง จ.สุพรรณบุรี



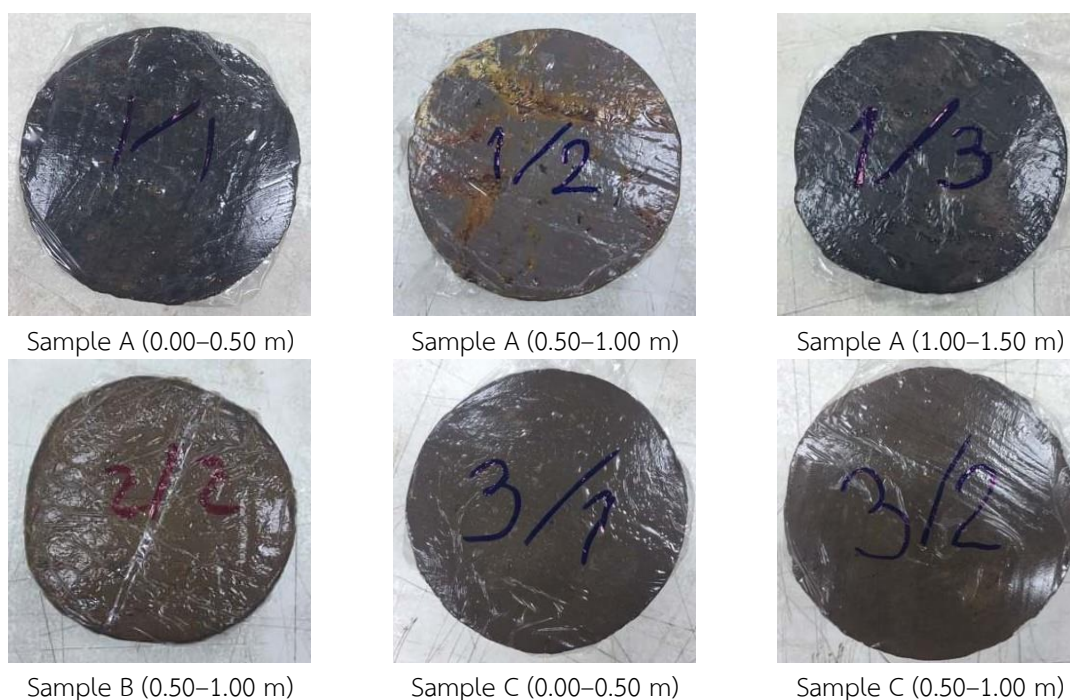
(b) จุดเก็บตัวอย่างดิน B ในพื้นที่ ต.ทุ่งบัว อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม



(c) จุดเก็บตัวอย่างดิน C ในพื้นที่ ต.ทุ่งทอง อ.เมือง จ.กาญจนบุรี

ภาพที่ 2-17 จุดเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษา

ลักษณะของตัวอย่างดินและสีดินที่จัดเก็บจากพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 จุด ที่ระดับช่วงความลึกต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 ตัวอย่างดินที่จัดเก็บจากพื้นที่ศึกษา

2.3.2 ผลการตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำภาคสนาม

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดข้อมูลอัตราการซึมของน้ำในพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 จุด เพื่อวัดการเคลื่อนที่ของน้ำจากผิวดินเข้าไปในดินตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือตามรอยแตกกระแหงด้วยแรงดึงดูดของโลก โดยอาศัยอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำ 2 ชนิด คือ

(1) เครื่องมือตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่นิยมใช้กันทั่วไป เพราะง่ายต่อการทดสอบและสามารถประดิษฐ์ขึ้นเองได้ ลักษณะของเครื่องมือและวิธีการใช้งานจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3385-03 ประกอบด้วยวงแหวนเหล็กสองวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว และ 24 นิ้ว ดังแสดงในภาพที่ 2-19

(2) เครื่องมือตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดแรงดึง (Tension Infiltrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำผ่านผิวดินสำหรับดินที่มีลักษณะเป็นดินค่อนข้างอิมตัว และเป็นเครื่องมือตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำผ่านผิวดินชนิดหนึ่งที่ใช้ทำงานง่ายและพกพาได้สะดวก ประกอบด้วยชิ้นส่วนสำคัญ 3 ชิ้น ได้แก่ (1) Reservoir (2) Mariot Bubbler และ (3) Infiltrometer Foot ดังแสดงในภาพที่ 2-20 โดยอัตราการซึมของน้ำจาก Tension Infiltrometer ผ่านผิวดินจะน้อยกว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านผิวดินในสภาพปกติ เพราะเครื่อง Tension Infiltrometer จะมีการรักษาความดันในระบบให้มีค่าติดลบเล็กน้อยด้วย Mariot Bubbler ซึ่งน้ำภายใน Tension Infiltrometer จะสามารถไหลออกจากระบบผ่าน Infiltration Disc ที่อยู่ส่วนฐาน (Infiltrometer Foot) ของตัวเครื่องลงสู่ผิวดินได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น โดยปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านผิวดินจะเท่ากับระดับน้ำที่หายไปจาก Reservoir



ภาพที่ 2-19 การตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำด้วย Double-Ring Infiltrometer



ภาพที่ 2-20 การตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำด้วย Tension Infiltrometer

ผลการตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำแสดงอยู่ในหน่วยเซนติเมตรต่อนาที่ และเซนติเมตรต่อชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 2-9 และภาพที่ 2-21 ซึ่งพบว่า อัตราการซึมของน้ำที่เวลาเริ่มต้นจะสูงและค่อย ๆ

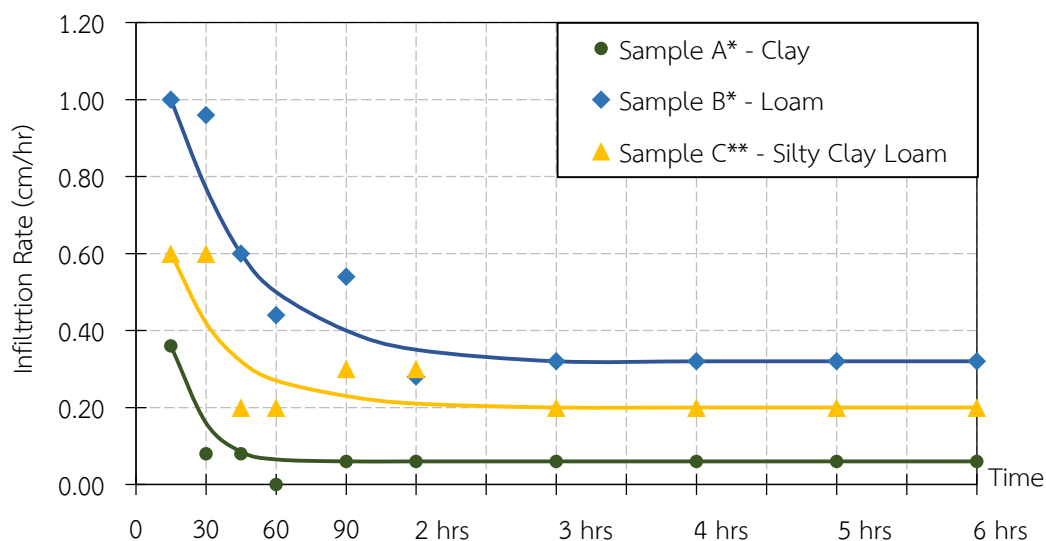
ลดลงถึงประมาณนาที่ที่ 60 หลังจากนั้นอัตราการซึมของน้ำมีแนวโน้มคงที่ จากผลการตรวจวัดยังแสดงให้เห็นว่าอัตราการซึมของน้ำในดินร่วนปนทรายสูงกว่าดินร่วนและดินเหนียว ตามลำดับ

ตารางที่ 2-9 ผลการตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำภาคสนาม

Time (min)	Infiltration Rate (Unit : cm/min)				Infiltration Rate (Unit : cm/hr)			
	A(I)	B(I)	B (T)	C(T)	A(I)	B(I)	B (T)	C(T)
0	–	–	–	–	–	–	–	–
15	0.006	0.017	0.013	0.010	0.360	1.000	0.800	0.600
30	0.001	0.016	0.003	0.010	0.080	0.960	0.200	0.600
45	0.001	0.010	0.003	0.003	0.080	0.600	0.200	0.200
60	0.000	0.007	0.000	0.003	0.000	0.440	0.000	0.200
90	0.001	0.009	0.003	0.005	0.060	0.540	0.200	0.300
120	0.001	0.005	0.003	0.005	0.060	0.280	0.200	0.300
180	0.001	0.005	0.002	0.003	0.060	0.320	0.100	0.200
240	0.001	0.005	0.002	0.003	0.060	0.320	0.100	0.200
300	0.001	0.005	0.002	0.003	0.060	0.320	0.100	0.200
360	0.001	0.005	0.002	0.003	0.060	0.320	0.100	0.200

หมายเหตุ : (I) ตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือ Double-Ring Infiltrometer

(T) ตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือ Tension Infiltrometer



ภาพที่ 2-21 เปรียบเทียบอัตราการซึมของน้ำผ่านตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด

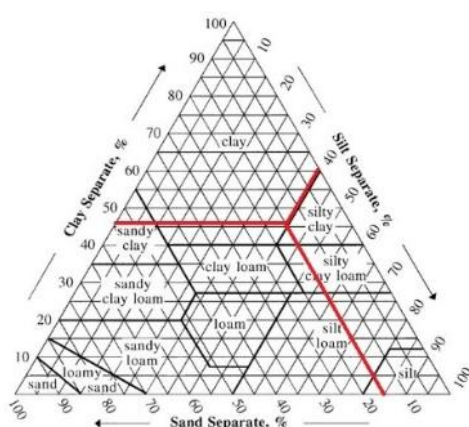
2.3.3 ผลการตรวจวัดข้อมูลพารามิเตอร์ดินในห้องปฏิบัติการ

2.3.3.1 ผลการจำแนกการกระจายตัวของอนุภาคดิน

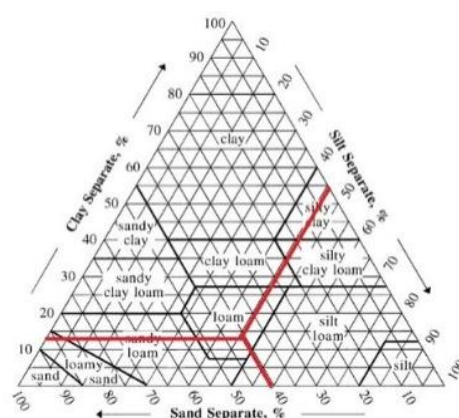
ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) ถูกจำแนกโดยวิธี USDA ซึ่งใช้วิธีการทดสอบหาขนาดมวลคละของดิน (Sieve Analysis) เพื่อคัดแยกอนุภาคกรวด ทราย และอนุภาคละเอียด และวิธีการทดสอบด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) เพื่อคัดแยกอนุภาคละเอียด (ทรายแป้ง และดินเหนียว) ซึ่งการจำแนกดินโดยวิธี USDA จะนำกรวดออกจากการจำแนก โดยการจำแนกชนิดดินจากสัดส่วนร้อยละของอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวเท่านั้นตามภาพที่ 2-22 โดยผลการจำแนกชนิดดินโดยการกระจายตัวของอนุภาคดินแสดงให้เห็นสัดส่วนของทรายแป้งที่ค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวและทรายตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2-10 ซึ่งการที่มีอนุภาคทรายแป้งจำนวนมากนั้น ส่งผลให้คุณสมบัติในการกักเก็บน้ำและระบายน้ำนั้นไม่ได้เป็นไปในทางใดทางหนึ่งอย่างชัดเจน อาทิเช่น ในตัวอย่างดิน A ที่ถูกจำแนกเป็นดินเหนียว ซึ่งเป็นดินที่มีการกักเก็บน้ำได้ดี แต่มีการระบายน้ำที่ไม่ดี การที่มีอนุภาคทรายแป้งอยู่มากอาจส่งผลให้การกักเก็บน้ำแยลงและการระบายน้ำดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวที่มีสัดส่วนอนุภาคดินเหนียวมาก

ตารางที่ 2-10 ผลการจำแนกการกระจายตัวของอนุภาคดินโดยวิธี USDA

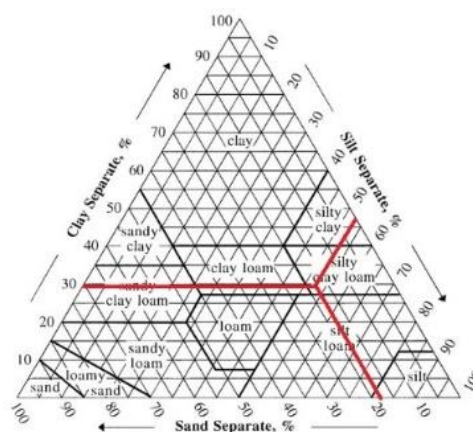
ตัวอย่างดิน	ชนิดดิน	การกระจายตัวของอนุภาคดิน (%)		
		ดินเหนียว	ดินทรายแป้ง	ดินทราย
A	ดินเหนียว (Clay)	47.0	39.0	14.0
B	ดินร่วน (Loam)	13.0	46.0	41.0
C	ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay Loam)	29.0	53.0	18.0



(a) Sample A



(b) Sample B

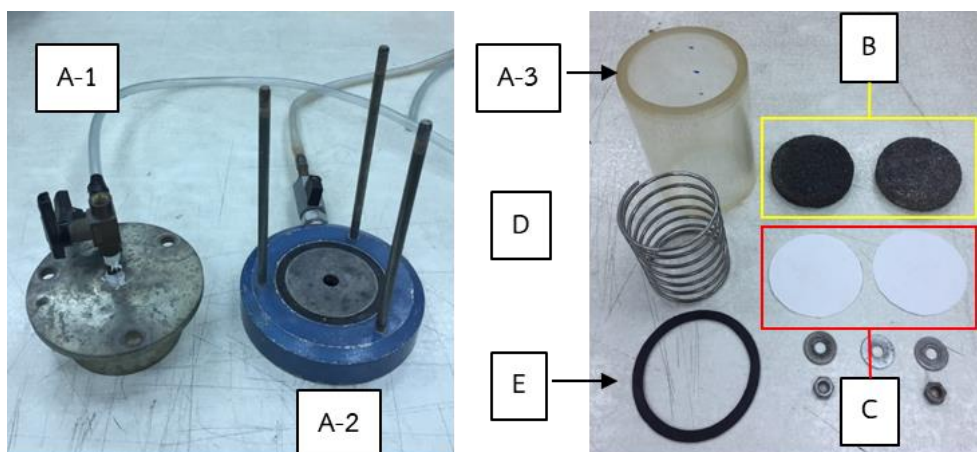


(c) Sample C

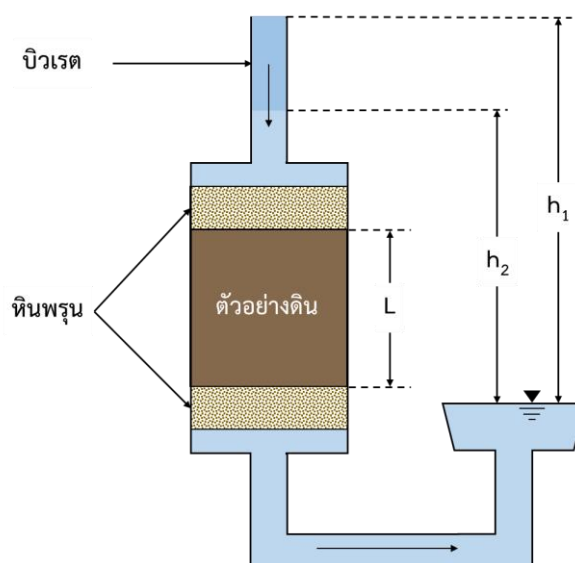
ภาพที่ 2-22 ผลการจำแนกชนิดดินโดยวิธี USDA

2.3.3.2 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำและพารามิเตอร์ดินที่เกี่ยวข้อง

ตัวอย่างดินได้ถูกทดสอบโดยใช้การทดสอบการซึมผ่านของน้ำแบบความดันเปลี่ยนแปลง (Falling Head Permeability Test) เนื่องจากตัวอย่างดินมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำค่อนข้างต่ำ ในการทดสอบการซึมผ่านของน้ำแบบความดันเปลี่ยนแปลงจะใช้อุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Permeameter) ตามภาพที่ 2-23 โดยประกอบด้วยอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (A) ซึ่งเป็นส่วนที่บรรจุตัวอย่างดินและส่งน้ำผ่านตัวอย่าง หินพูน (B) เพื่อป้องกันตัวอย่างและกระจายแรงดันน้ำจากอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ กระดาษกรอง (C) เพื่อป้องกันการสัมผัสของหินพูนและตัวอย่างดินโดยตรง สปริง (D) เพื่อป้องกันตัวอย่างดินจากแรงดัน (Uplift Pressure) ยาง (E) สำหรับป้องกันการซึมผ่านของน้ำจากกระบอกตัวอย่าง (A-3) และฝาครอบ (A-1) และบิวเรต (Burette) สำหรับวัดระดับที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อทำการบรรจุตัวอย่างดินลงในกระบอกตัวอย่าง และทำการประกอบอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำตามภาพที่ 2-24 ตัวอย่างดินจะถูกทำให้อยู่ในจุดอิ่มน้ำก่อนทำการทดสอบ โดยน้ำจะไหลผ่านตัวอย่างดินจากบิวเรตสู่ด้านล่างของตัวอย่างตามแนวตั้ง ซึ่งระดับที่เปลี่ยนแปลงไป ($h_1 - h_2$) ในระยะเวลาใด ๆ จะถูกบันทึกไว้เพื่อคำนวณหา K_s



ภาพที่ 2-23 อุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 2-24 โครงสร้างของอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับดินและจำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินทั้งแบบจำลอง SWAP และแบบจำลอง WETSPASS ได้แก่ ความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ปริมาณน้ำในดินที่จุดอิ่มตัว (Saturated Water Content) และความจุน้ำสนาม (Field Capacity) หลังจากทำการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ ตัวอย่างดินจะถูกบันทึกน้ำหนักและปริมาตร เพื่อคำนวณค่าของพารามิเตอร์จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและปริมาตร (Weight-Volume Relationship) ซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2-11 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและพารามิเตอร์ดินที่เกี่ยวข้อง

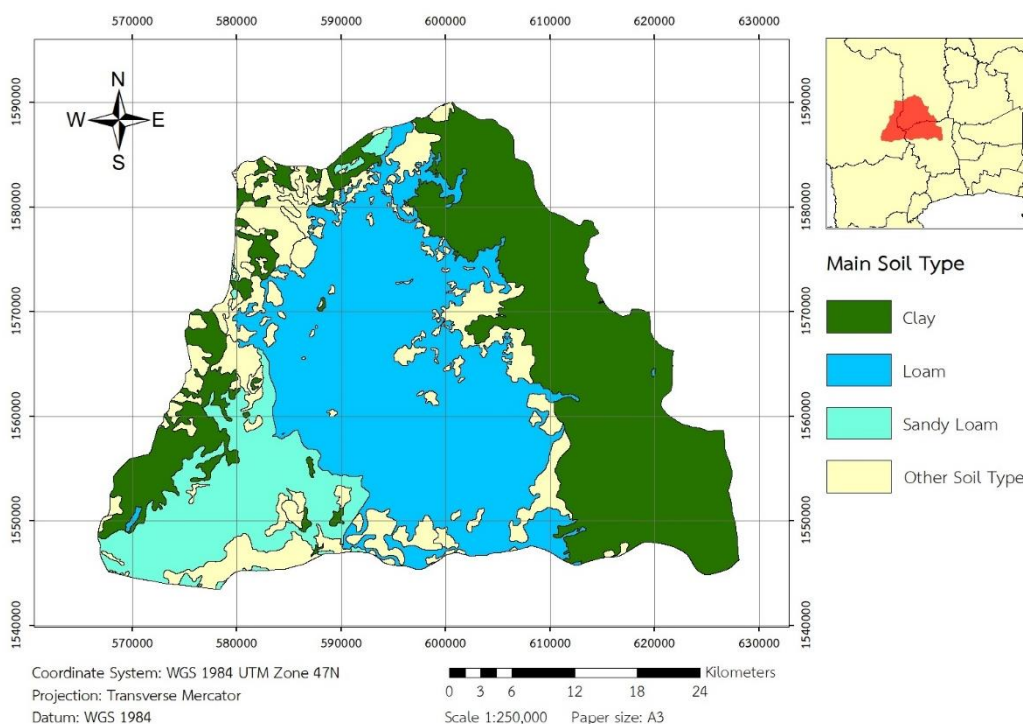
Soil Sample	Depth	Soil Texture	Dry Density	Saturated Water Content	Field Capacity	Void Ratio	Infiltration Rate	K _s at 20°C
(Unit)	(m)		(g/cm ³)	(%w/w)	(%w/w)		(cm/hr)	(cm/hr)
A	0.00–0.50	Clay	1.398	35.08	22.85	0.968	0.234 ^{1/}	8.16×10 ⁻⁵
	0.50–1.00		1.065	53.94	42.37	1.357		2.18×10 ⁻³
	1.00–1.50		0.858	82.24	59.25	2.419		1.19×10 ⁻³
B	0.50–1.00	Loam	1.866	20.52	17.48	0.624	0.890 ^{1/}	8.34×10 ⁻⁴
C	0.00–0.50	Silty	1.640	25.68	20.61	0.730	0.525 ^{2/}	1.62×10 ⁻⁴
	0.50–1.00	Clay Loam	1.664	24.35	18.83	0.684		1.21×10 ⁻⁴

หมายเหตุ : ^{1/} ตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือ Double-Ring Infiltrrometer

^{2/} ตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือ Tension Infiltrrometer

2.4 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP

เนื่องจากแบบจำลอง SWAP สามารถจำลองการไหลของน้ำภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวใน 1 มิติเท่านั้น เพื่อให้ผลการจำลองสะท้อนถึงลักษณะของพื้นที่ศึกษา ดังนั้น ในการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP จึงจำเป็นต้องแบ่งการจำลองออกเป็น 3 พื้นที่ และนำค่าการเติมน้ำใต้จากค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของทั้ง 3 พื้นที่มาใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษา โดยแบ่งตามชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษา 3 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทราย ดังภาพที่ 2-25 โดยที่ดินแต่ละชนิดจะมีลักษณะการใช้ที่ดินเป็นตัวแทนของดินชนิดนั้น ได้แก่ พื้นที่นาข้าวในดินเหนียว พื้นที่พืชไรในดินร่วน และพื้นที่สวนในดินร่วนปนทราย ตามลำดับ เนื่องจากผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP นี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS ที่อยู่ในลักษณะของการกระจายตัว ดังนั้น ข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง SWAP จึงต้องสัมพันธ์กับข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง WETSPASS เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ของการเติมน้ำใต้ดินกับลักษณะของพื้นที่นั้น ๆ



ภาพที่ 2-25 ชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษา

2.4.1 การจัดเตรียมข้อมูลสำหรับการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP

ข้อมูลและพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) ส่วนอุทกนิยมิวิทยา (2) ส่วนพารามิเตอร์พืช และ (3) ส่วนพารามิเตอร์ดิน ตามตารางที่ 2-12 เนื่องจากการจำลองถูกแบ่งออกตามชนิดของดินหลักในพื้นที่ ดังนั้น ข้อมูลและพารามิเตอร์ของแต่ละส่วนนั้นจะถูกจัดเตรียมขึ้นสำหรับเป็นตัวแทนของพื้นที่ตามชนิดดินแต่ละชนิด

ตารางที่ 2-12 ข้อมูลที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP

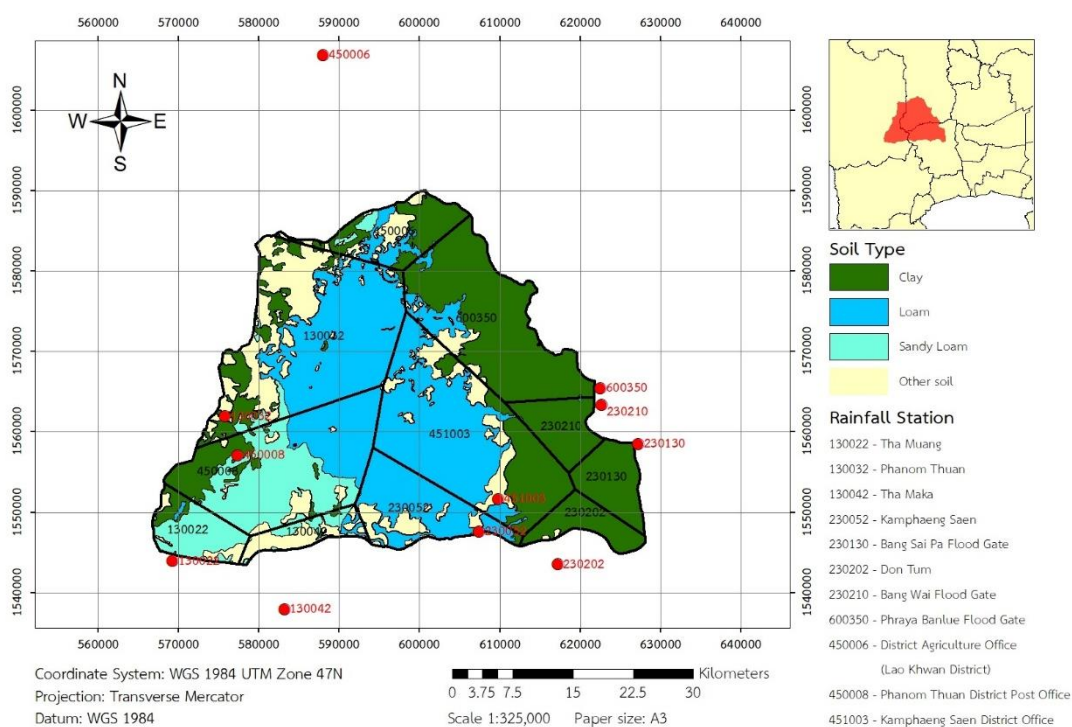
ส่วนข้อมูล	ข้อมูลนำเข้า	แหล่งข้อมูล	ระยะเวลา
ส่วนอุตุนิยมวิทยา	ข้อมูลฝน	TMD และ RID	ปี พ.ศ. 2543–2560
	ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด		
	ข้อมูลการระเหยคายน้ำเบื้องต้น		
	ข้อมูลความเร็วลม		
	ข้อมูลความชื้นในอากาศ	คำนวณจากข้อมูลอื่น ๆ	
	ข้อมูลการแผ่รังสีดวงอาทิตย์		
	ข้อมูลความถี่ฝน		
ส่วนพารามิเตอร์พืช	ระยะเวลาการเจริญเติบโต	รวบรวมจากเอกสาร งานวิจัยอื่น ๆ	–
	ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index, LAI)		
	ความสูงพืช		
	ความลึกของรากพืช		
	การสกัดกั้นน้ำ	ค่าคงที่	
	แผนการเพาะปลูก	RID	
ส่วนพารามิเตอร์ดิน	ความชื้นคงค้างในดิน	การวิเคราะห์ตัวอย่าง ดินจากภาคสนาม	–
	ความชื้นในดินที่สภาวะอิ่มตัว		
	ความหนาแน่นแห้งของดิน		
	การนำชลศาสตร์	พารามิเตอร์ปรับแก้	

2.4.1.1 ส่วนอุตุนิมวิทยา

ข้อมูลที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลอง SWAP สำหรับส่วนอุตุนิมวิทยาประกอบด้วย ข้อมูลฝน ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ข้อมูลการระเหยคายน้ำเบื้องต้น ข้อมูลความเร็วลม ข้อมูลความชื้นในอากาศ ข้อมูลการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ และข้อมูลความถี่ฝน ซึ่งข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง SWAP ต้องเป็นข้อมูลรายวันเท่านั้น และเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับแบบจำลอง WETSPASS ดังนั้น จากข้อมูลรายเดือนที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง WETSPASS จึงจำเป็นต้องทำให้อยู่ในรูปของข้อมูลรายวัน โดยข้อมูลจากแบบจำลอง WETSPASS ซึ่งอยู่ในรูปของข้อมูลการกระจายตัวเชิงพื้นที่ (Raster) จะถูกแบ่งออกเป็น 3 พื้นที่ตามชนิดของดินทั้ง 3 ชนิดหลัก โดยค่าเฉลี่ยของข้อมูลนั้น ๆ ในแต่ละพื้นที่จะถูกใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่ในการจำลอง

2.4.1.1.1 ข้อมูลฝน

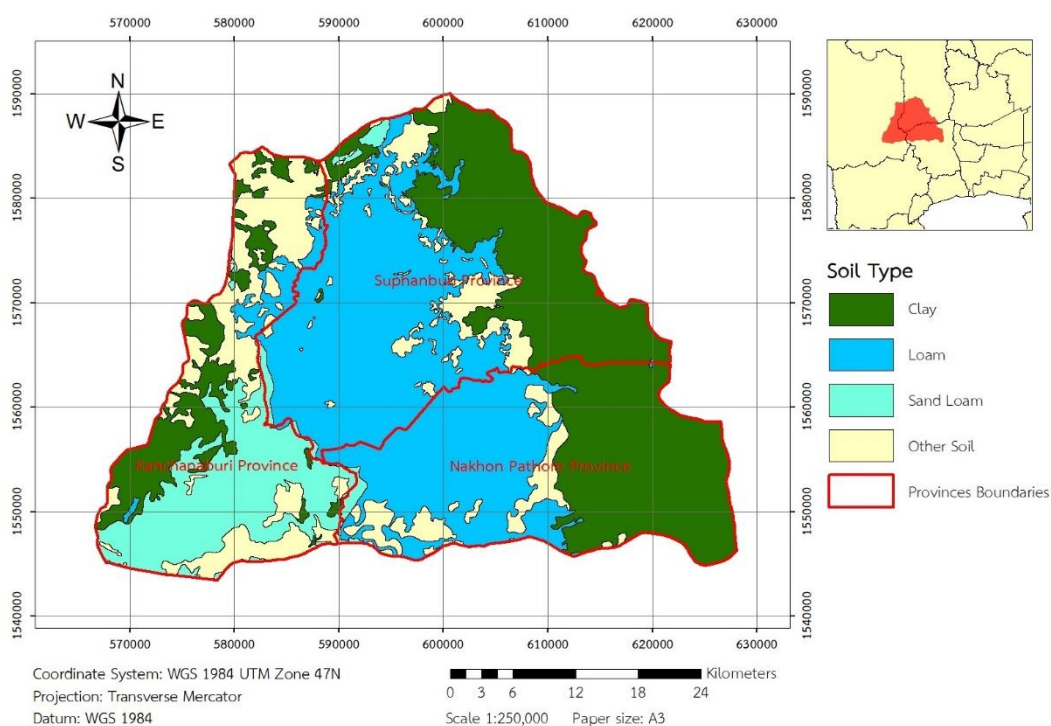
ข้อมูลปริมาณฝนรายเดือนที่ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาการกระจายตัวของฝนในแต่ละเดือน โดยใช้วิธี Thiessen Polygon จะถูกนำมาแบ่งออกตามชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษาตามภาพที่ 2-26 ซึ่งค่าเฉลี่ยฝนในพื้นที่นั้น ๆ จะถูกใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลฝนในพื้นที่ โดยปริมาณฝนรายเดือนจะถูกแบ่งออกตามจำนวนวันของแต่ละเดือนเป็นข้อมูลรายวัน



ภาพที่ 2-26 ข้อมูลฝนที่ถูกแบ่งออกตามชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษา

2.4.1.1.2 ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด

ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดรายเดือนถูกรวบรวมจากกรมอุตุนิยมวิทยา (TMD) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยรายจังหวัด ดังนั้น การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนในพื้นที่ศึกษาจึงถูกแบ่งออกตามพื้นที่จังหวัด เนื่องจากการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP การจำลองจะถูกนำมาแบ่งออกตามชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษา ดังนั้น ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยของแต่ละเดือนจะถูกใช้เป็นตัวแทนอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละพื้นที่ โดยการเฉลี่ยในพื้นที่ตามภาพที่ 2-27 ซึ่งค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยในพื้นที่นั้น ๆ จะถูกใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในพื้นที่ โดยค่าเฉลี่ยของเดือนนั้น ๆ จะถูกใช้แทนข้อมูลรายวัน เนื่องจากความผันแปรของข้อมูลอุณหภูมิตามรายวันในแต่ละเดือนไม่แตกต่างกันมากนัก



ภาพที่ 2-27 ข้อมูลอุณหภูมิที่ถูกแบ่งออกตามชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษา

2.4.1.1.3 ข้อมูลการระเหยคายน้ำเบื้องต้น

ข้อมูลปริมาณการระเหยคายน้ำเบื้องต้น (Potential Evapotranspiration, PET) จะถูกประมาณขึ้นโดยวิธีของ Thornthwaite ซึ่งปริมาณการระเหยคายน้ำเบื้องต้นจากวิธีการนี้จะถูกกำหนดด้วยค่าของอุณหภูมิเป็นหลักภายใต้สมการดังต่อไปนี้ (ธีระพล ตั้งสมบูรณ์, 2549)

$$PET = e \times d \quad \text{-----}(2-1)$$

โดยที่ $e = ET_o$ เฉลี่ยรายเดือน

$d =$ Day Length Factor ประจำเดือน

โดยค่าของ ET_o เฉลี่ยรายเดือน (e) นั้นจะถูกกำหนดช่วงของอุณหภูมิ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } 0.20 < T < 26.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad e = 1.6 (10T/I)^a \quad \text{-----}(2-2)$$

$$\text{เมื่อ } 26.5 < T \leq 32.0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad e = -39.702 + (3.09655) T - (0.041091) T^2 \quad \text{-----}(2-3)$$

โดยที่ $T =$ อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ($^\circ\text{C}$)

$$a = (6.75 \times 10^{-7}) I^3 - (7.71 \times 10^{-5}) I^2 + (1.792 \times 10^{-2}) I + 0.49239$$

I = ดัชนีการวัดค่าความร้อนรายปี (Annual Heat Index)

โดยค่าของดัชนีการวัดค่าความร้อน (Annual Heat Index, I) จะเท่ากับผลรวมของดัชนีการวัดค่าความร้อนรายเดือน (Thornthwaite Heat Index, i) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$i = (T/5)^{1.514} \text{-----}(2-4)$$

เนื่องจากข้อมูลปริมาณการระเหยคายน้ำเบื้องต้นโดยวิธีของ Thornthwaite นี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ดังนั้น การกระจายตัวของปริมาณการระเหยคายน้ำเบื้องต้นในพื้นที่ศึกษาจึงถูกแบ่งตามการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ศึกษา ซึ่งจะถูกแบ่งออกตามพื้นที่ 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดสุพรรณบุรี และจังหวัดนครปฐม

2.4.1.1.4 ข้อมูลความเร็วลม

ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยถูกรวบรวมจากกรมอุตุนิยมวิทยา (TMD) ซึ่งถูกใช้เพื่อหาการกระจายตัวของความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ โดยวิธีการคำนวณค่าระยะทางกลับโดยน้ำหนัก (Inverse Distance Weighting) การกระจายตัวของความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่จะถูกแบ่งออกตามชนิดของดิน โดยค่าความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่นั้น ๆ จะถูกใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลความเร็วลมในพื้นที่ โดยค่าเฉลี่ยของเดือนนั้น ๆ จะถูกใช้แทนข้อมูลรายวัน เนื่องจากความผันแปรของข้อมูลความเร็วลมรายวันในแต่ละเดือนไม่แตกต่างกันมากนัก

2.4.1.1.5 ข้อมูลความดันไอที่จุดอิ่มตัว

ข้อมูลความดันไอที่จุดอิ่มตัว (Saturated Vapor Pressure, e_s) เป็นข้อมูลที่ใช้จำเป็นต่อการประมาณการระเหยคายน้ำ (Evapotranspiration) โดยวิธีของ Penman Monteith ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์หาการใช้ น้ำของพืช ค่าความดันไอที่จุดอิ่มตัวจะขึ้นกับค่าของอุณหภูมิ ณ เวลานั้น โดยจะใช้ข้อมูลการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยในพื้นที่ศึกษา ซึ่งจะถูกแบ่งออกตามชนิดของดินเป็นตัวแทนข้อมูลของพื้นที่นั้น ๆ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Allen et al., 1998)

$$e_s(T) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 T}{T+237.3}\right) \text{-----}(2-5)$$

โดยที่ e_s = ความดันไอที่จุดอิ่มตัว (kPa)

T = อุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)

2.4.1.1.6 ข้อมูลการแผ่รังสีดวงอาทิตย์

ข้อมูลการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation, R_n) เป็นข้อมูลที่เป็นต่อการประมาณการวิเคราะห์หาการใช้ น้ำของพืช โดยค่าการแผ่รังสีดวงอาทิตย์หาได้จากความสัมพันธ์ของพลังงานที่ถูกดูดซับ สะท้อน และปล่อยออกจากผิวโลก ดังสมการต่อไปนี้ (Kroes et al., 2017)

$$R_n = (1 - \alpha_r) R_s - R_{nl} \quad \text{-----}(2-6)$$

โดยที่ α_r = สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient หรือ Albedo)
 R_s = การแผ่รังสีแห่งโลก (Global Solar Radiation, $J m^{-2} d^{-1}$)
 R_{nl} = การแผ่รังสีคลื่นยาวสุทธิ (Net Longwave Radiation, $J m^{-2} d^{-1}$)

ค่าของ α_r จะอยู่ระหว่าง 0.20–0.25 โดยแบบจำลอง SWAP จะกำหนดให้เป็น 0.23 สำหรับพื้นที่ผิวปกคลุมด้วยพืช และ 0.15 สำหรับพื้นที่ดินเปล่า

สำหรับค่าการแผ่รังสีคลื่นยาวสุทธิ (R_{nl}) นั้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_{nl} = \sigma_{sb} \left[\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_{act}}) (0.1 + 0.9 N_{rel}) \quad \text{-----}(2-7)$$

โดยที่ σ_{sb} = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann
 T_{max} = อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลวิน)
 T_{min} = อุณหภูมิต่ำสุด (องศาเซลวิน)
 e_{act} = ค่าความดันไอจริง (กำหนดให้เท่ากับความดันไอที่จุดอิ่มตัว, kPa)
 N_{rel} = ระยะเวลาแดดเวลาสัมพันธ์ (-)

ค่าของระยะเวลาแดดเวลาสัมพันธ์ (N_{rel}) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$N_{rel} = \left(\frac{R_s}{R_a} - a \right) \frac{1}{b} \quad \text{-----}(2-8)$$

โดยที่ R_a = ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Extraterrestrial Solar Radiation, $J m^{-2} d^{-1}$)
 a, b = สัมประสิทธิ์ของ Angstrom (Angstrom Coefficient)

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของ Angstrom จะถูกกำหนดโดยสภาพภูมิอากาศในพื้นที่กรณีที่ใช้สำหรับทั่วไปแนะนำให้ใช้ $a = 0.25$ และ $b = 0.50$ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Extraterrestrial Solar Radiation, R_a) จะขึ้นอยู่กับละติจูดและจำนวนวันในปีนั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_a = \frac{G_{sc}}{\pi} d_r [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad \text{-----}(2-9)$$

โดยที่ G_{sc} = ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ (Solar Constant, $J m^{-2} d^{-1}$)

d_r = ระยะทางสัมพัทธ์ผกผันระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ (Inverse Relative Distance Earth-Sun)

ω_s = มุมตกของดวงอาทิตย์ (Sunset Angle, rad)

ϕ = ละติจูด (Latitude, rad)

δ = มุมเดคลิเนชันของดวงอาทิตย์ (Solar Declination, rad)

ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์อย่างหยาบจะมีค่าประมาณ $1.362 kW/m^2$ หรือ $117,590.4 kJ m^{-2}d^{-1}$ ซึ่งพารามิเตอร์อื่น ๆ ทั้งระยะทางสัมพัทธ์ผกผันระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ (d_r) และมุมเดคลิเนชันของดวงอาทิตย์ (δ) เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับจำนวนวัน (J) ในปีนั้น ๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ถึง 365 หรือ 366 วัน สามารถประมาณได้จากสมการต่อไปนี้

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad \text{-----}(2-10)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad \text{-----}(2-11)$$

มุมตกของดวงอาทิตย์ (ω_s) จะขึ้นกับมุมเดคลิเนชันของดวงอาทิตย์ (δ) และละติจูด (ϕ) ซึ่งสามารถประมาณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \tan(\delta)] \quad \text{-----}(2-12)$$

2.4.1.1.7 ข้อมูลความถี่ฝน

ความถี่ฝน คือ สัดส่วนระหว่างระยะเวลาที่ฝนตก (ซังโงม) ในระยะเวลา 1 วัน (24 ชั่วโมง) เนื่องจากข้อมูลนำเข้าทั้งหมดถูกปรับแก้จากข้อมูลรายเดือน โดยแบ่งออกตามชนิดของดินในพื้นที่ ดังนั้น ค่าความถี่ฝนจะถูกปรับให้สัมพันธ์กับข้อมูลฝน โดยประมาณขึ้นจากสัดส่วนระหว่างจำนวนวันที่ฝนตกในแต่ละเดือนเป็นตัวแทนค่าความถี่ฝนในแต่ละเดือนดังที่แสดงในตารางที่ 2-13

ตาราง 2-13 ค่าความถี่ฝนสำหรับนำเข้าแบบจำลอง SWAP

ลำดับ	เดือน	จำนวนวัน	จำนวนวันที่ฝนตก	ความถี่ฝน
1	มกราคม	31	1.0	0.0323
2	กุมภาพันธ์	28	3.0	0.1071
3	มีนาคม	31	3.5	0.1129
4	เมษายน	30	7.0	0.2333

ตารางที่ 2-13 (ต่อ)

ลำดับ	เดือน	จำนวนวัน	จำนวนวันที่ฝนตก	ความถี่ฝน
5	พฤษภาคม	31	16.0	0.5161
6	มิถุนายน	30	16.0	0.5333
7	กรกฎาคม	31	17.0	0.5484
8	สิงหาคม	31	20.0	0.6452
9	กันยายน	30	21.0	0.7000
10	ตุลาคม	31	18.0	0.5806
11	พฤศจิกายน	30	6.5	0.2167
12	ธันวาคม	31	1.0	0.0323

2.4.1.2 ส่วนพารามิเตอร์พืช

การจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยแบบจำลอง SWAP จะถูกแบ่งออกตามชนิดของดินหลักในพื้นที่ศึกษา 3 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทราย โดยที่ดินแต่ละชนิดจะมีการใช้ที่ดินเป็นตัวแทนของดินชนิดนั้น ได้แก่ พื้นที่นาข้าว พื้นที่พืชไร่ และพื้นที่สวน ตามลำดับ ดังนั้น ชนิดของพืชจึงถูกกำหนดตามลักษณะการใช้ที่ดินเพื่อเป็นตัวแทนพืชของพื้นที่นาข้าว พื้นที่พืชไร่ และพื้นที่สวน ได้แก่ ข้าว อ้อย และผักสวนครัว ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 2-14 ดังนี้

ตารางที่ 2-14 รายละเอียดของพารามิเตอร์พืชสำหรับแบบจำลอง SWAP

พารามิเตอร์	หน่วย	ข้าว	อ้อย	ผักสวนครัว
ระยะเวลาการเจริญเติบโต	วัน	120	300	366
ดัชนีพื้นที่ใบ	—	4	4	4
ความสูงพืช	เซนติเมตร	100	300	80
ความลึกของรากพืช	เซนติเมตร	20	120	40
การสกัดกั้นน้ำ	—	0.25	0.25	0.25
แผนการเพาะปลูก	—	พฤษภาคม–พฤศจิกายน	พฤษภาคม–มีนาคม	ตลอดทั้งปี

พารามิเตอร์พืชอื่น ๆ ภายในข้อมูลพืชสำหรับแบบจำลอง SWAP จะใช้ค่าพื้นฐานจากฐานข้อมูลของแบบจำลอง SWAP ซึ่งข้อมูลพารามิเตอร์พืชดังตารางที่ 2-14 เป็นส่วนที่ปรับแก้ให้สัมพันธ์กับพืชที่ใช้เท่านั้น

2.4.1.3 ส่วนพารามิเตอร์ดิน

พารามิเตอร์ดินเป็นส่วนสำคัญในการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP ซึ่งพารามิเตอร์ดินจะได้อาจจากการเก็บตัวอย่างดินภาคสนาม และผลจากการทดสอบคุณสมบัติดินเป็นหลัก ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทราย โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2-15

ตารางที่ 2-15 รายละเอียดพารามิเตอร์ดินสำหรับแบบจำลอง SWAP

พารามิเตอร์	หน่วย	ดินเหนียว	ดินร่วน	ดินร่วนปนทราย
ความชื้นคงค้างในดิน	สัดส่วนโดยปริมาตร	0.00–0.09	0.03	0.04
ความชื้นในดินที่สภาวะอิ่มตัว	สัดส่วนโดยปริมาตร	0.49–0.71	0.38	0.41–0.51
ความหนาแน่นแห้งของดิน	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	858–1,398	1,866	1,640–2,137
การนำชลศาสตร์	เซนติเมตรต่อวัน	0.08	0.6–2.2	0.8–1.0

2.4.2 การพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP

การจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP ในการศึกษาจะดำเนินการจำลองการเติมน้ำใต้ดินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560 โดยแบ่งช่วงข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2553 สำหรับใช้ในการปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และช่วงข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554–2560 สำหรับใช้ในการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Validation)

2.4.2.1 ข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง SWAP

ข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) ส่วนข้อมูลอุตุนิยมวิทยา (.YYY) (2) ส่วนข้อมูลพืช (.crp) และ (3) ส่วนข้อมูลนำเข้าหลัก (.swp) ซึ่งทุกไฟล์ข้อมูลนำเข้าจะอยู่ในรูปของไฟล์ข้อความ (Text File) โดยรูปแบบการจัดเรียงข้อมูลภายในไฟล์ข้อความต้องอยู่ในรูปแบบที่แบบจำลอง SWAP ได้กำหนดเอาไว้

2.4.2.1.1 ส่วนข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจะประกอบด้วยหมายเลขสถานี (Station) วันที่ (DD) เดือน (MM) ปี (YYYY) การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (RAD, kJ/m^2) อุณหภูมิต่ำสุด ($T_{\min}$, $^{\circ}\text{C}$) อุณหภูมิสูงสุด ($T_{\max}$, $^{\circ}\text{C}$) ค่าความดันไอที่จุ่มตัว (HUM, kPa) ความเร็วลม (WIND, m/s) ปริมาณฝน (RAIN, mm) การระเหยคายน้ำเบื้องต้น (ET_{ref}, mm) และความถี่ฝน (WET, d) โดยข้อมูลทั้งหมดต้องถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบตามภาพที่ 2-28 โดยที่นามสกุลไฟล์ (File Extension) จะต้องถูกตั้งให้เป็นเลขสามตัวท้ายของปี (ค.ศ.) นั้น ๆ และชื่อไฟล์ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา (File Name) ทุกไฟล์จะต้องตั้งเป็นชื่อเดียวกัน

```

PSB.000 - Notepad
File Edit Format View Help
*****
* Filename: PSB.000
* Contents: SWAP 4.0 - Daily meteorological data
*****
* Comment area:
*
*****
Station  DD    MM    YYYY    RAD    Tmin    Tmax    HUM    WIND    RAIN    ETref    WET
*      nr      nr      nr      kJ/m2   uC      uC      kPa    m/s     mm      mm      d
*****
'283'    1      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'    2      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'    3      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'    4      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'    5      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'    6      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'    7      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'    8      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'    9      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   10      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   11      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   12      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   13      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   14      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   15      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   16      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   17      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   18      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   19      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   20      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   21      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323
'283'   22      1      2000    9387.6   15.3    34.6    3.42    1.3     0.1     0.4     0.0323

```

ภาพที่ 2-28 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาปี พ.ศ. 2543 (ค.ศ. 2000)

2.4.2.1.2 ส่วนข้อมูลพืช

ข้อมูลพืชในการศึกษานี้ข้าว อ้อย และผักสวนครัว ถูกเลือกเป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษา ซึ่งข้อมูลพืชแต่ละชนิดจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ (1) ส่วนการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth Section) และ (2) ส่วนชลประทาน (Irrigation Scheduling Section) โดยที่นามสกุลไฟล์ (File Extension) จะต้องถูกตั้งให้เป็น “.crp” โดยในการศึกษานี้ปัจจัยต่าง ๆ ในส่วนชลประทานจะไม่ถูกนำมาวิเคราะห์หาการเติมน้ำใต้ดินด้วย และส่วนการเจริญเติบโตของพืชจะประกอบด้วย 10 ส่วนย่อย ดังรายละเอียดดังตารางที่ 2-16

ตารางที่ 2-16 รายละเอียดกำหนดข้อมูลในส่วนการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth Section)

ส่วนย่อยที่	ส่วนย่อย	รายละเอียด
1	Crop Development	ในส่วนนี้จะต้องกำหนดรูปแบบระยะเวลาการเจริญเติบโต ซึ่งในการศึกษานี้จะเลือกเป็นแบบกำหนดตายตัว โดยกำหนดให้เป็นค่าเดียวกันตลอดช่วงระยะเวลาการเพาะปลูก
2	Light Extinction	ค่า Light Extinction จะถูกกำหนดตามค่าพื้นฐานของแบบจำลองไว้ที่ 0.75
3	Leaf Area Index or Soil Cover Fraction	ในการศึกษานี้จะเลือกใช้ค่า LAI โดยค่าจะถูกกำหนดตามชนิดของพืชดังตารางที่ 2-14

ตารางที่ 2-16 (ต่อ)

ส่วนย่อยที่	ส่วนย่อย	รายละเอียด
4	Crop Factor or Crop Height	ในการศึกษานี้จะเลือกใช้ค่าความสูงพืช (Crop Height) โดยค่าจะถูกกำหนดตามชนิดของพืชดังตารางที่ 2-14
5	Rooting Depth	ค่าความลึกของรากพืช (Rooting Depth) จะถูกกำหนดตามชนิดของพืชดังตารางที่ 2-14
6	Yield Response	พารามิเตอร์เป็นที่เกี่ยวข้องกับปริมาณผลผลิตและการใช้น้ำ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการจำลองการเจริญเติบโตของพืชและวิเคราะห์ผลผลิต ดังนั้น ใน การศึกษานี้จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า
7	Soil Water Extraction by Plant Roots	พารามิเตอร์ในส่วนนี้จะถูกกำหนดตามข้อมูลพื้นฐานตามฐานข้อมูลของแบบจำลอง SWAP
8	Salt Stress	ส่วนนี้จะถูกกำหนดในไม่มีความเครียดจากความเค็ม
9	Interception	ค่าการสกัดกั้นน้ำ (Interception) ถูกกำหนดไว้เป็นค่าคงที่ ดังตารางที่ 2-14
10	Root Density Distribution and Root Growth	พารามิเตอร์ในส่วนนี้จะถูกกำหนดตามข้อมูลพื้นฐานตามฐานข้อมูลของแบบจำลอง SWAP

2.4.2.1.3 ส่วนข้อมูลนำเข้าหลัก

ส่วนข้อมูลนำเข้าหลัก (Main Input Data) เป็นส่วนที่เชื่อมโยงข้อมูลนำเข้าทั้งหมดเข้าด้วยกัน และยังเป็นส่วนสำคัญที่ควบคุมการจำลองการเติมน้ำใต้ดินทั้งวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลและผลการจำลอง โดยจะประกอบด้วย 8 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) ส่วนทั่วไป (General Section) (2) ส่วนอุตุนิยมวิทยา (Meteorological Section) (3) ส่วนพืช (Crop Section) (4) ส่วนดิน (Soil Section) (5) ส่วนการระบายน้ำด้านข้าง (Lateral Drainage Section) (6) ส่วนขอบข่ายด้านล่าง (Bottom Boundary Section) (7) ส่วนการแผ่ความร้อน (Heat Flow Section) และ (8) ส่วนการไหลของสารละลาย (Solute Section) โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2-17

ตารางที่ 2-17 รายละเอียดข้อมูลนำเข้าหลักของแบบจำลอง SWAP

ส่วนหลัก	ส่วนย่อย	รายละเอียด
ส่วนทั่วไป (General Section)	Part 1 Environment	ในส่วนนี้มีไว้เพื่อกำหนดคำอธิบายการจำลอง ตำแหน่งของไฟล์ข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ และการแสดงผลระหว่างการจำลอง
	Part 2 Simulation Period	กำหนดช่วงเวลาที่ทำจำลอง โดยในการศึกษานี้จะเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2543 จนถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2560

ส่วนหลัก	ส่วนย่อย	รายละเอียด
	Part 3 Output Dates	กำหนดเวลาที่ต้องการทราบผลการจำลอง โดยสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งแบบรายวัน รายเดือน รายปี และเจาะจงช่วงเวลา
	Part 4 Output Files	ส่วนนี้จะทำการกำหนดชื่อไฟล์ของผลการจำลอง และเลือกผลการจำลองที่ต้องการจากตัวเลือกภายในแบบจำลอง

ตารางที่ 2-17 (ต่อ)

ส่วนหลัก	ส่วนย่อย	รายละเอียด
ส่วนอุตุนิยมวิทยา (Meteorological Section)	–	ในส่วนนี้จะต้องทำการกำหนดข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับไฟล์ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาได้แก่ (1) ชื่อไฟล์ข้อมูลนำเข้าอุตุนิยมวิทยา (2) วิธีการวิเคราะห์การระเหยคายน้ำ (ในการศึกษานี้เลือกใช้ Penman-Monteith) (3) สำหรับกรณีที่เลือกใช้ Penman-Monteith จะต้องกำหนดละติจูด ระดับความสูง และความสูงของเครื่องวัดความเร็วลมของสถานีตรวจวัดอากาศ
ส่วนพืช (Crop Section)	Part 1 Crop Rotation Scheme	ในส่วนนี้จะทำการกำหนดช่วงเวลาในการปลูกพืช วิธีการเริ่มต้นการเจริญเติบโต (แบบทันทีหรือแบบหว่าน) ช่วงเวลาเก็บเกี่ยว ชื่อพืช และวิธีการวิเคราะห์การเจริญเติบโต ในการศึกษานี้กำหนดให้พื้นที่ต่าง ๆ ใช้พืชชนิดเดียวเป็นตัวแทนการเพาะปลูกพื้นที่ ดังนั้น การกำหนดช่วงเวลาการเพาะปลูกจึงกำหนดชนิดของพืชชนิดเดียว ดังแสดงในตารางที่ 2-14
	Part 2 Fixed Irrigation Applications	ในการศึกษานี้ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยเกี่ยวกับการใช้น้ำชลประทาน ดังนั้น ในส่วนนี้จะทำการกำหนดให้ไม่มีการใช้น้ำชลประทาน

ตารางที่ 2-17 (ต่อ)

ส่วนหลัก	ส่วนย่อย	รายละเอียด
ส่วนดิน (Soil Section)	Part 1 Initial Soil Moisture Condition	ในส่วนนี้จะทำการกำหนดวิธีการวิเคราะห์ค่าความชื้นในดินเริ่มต้น โดยในการศึกษานี้จะกำหนดให้ค่าความชื้นในดินเริ่มต้นสัมพันธ์กับระดับน้ำใต้ดิน (ค่าความชื้นในดินเริ่มต้นนี้เป็นพารามิเตอร์สำหรับปรับแก้)
	Part 2 Ponding, Run-off, and Run-on	กำหนดลักษณะการเกิดการเจ็มนองของน้ำก่อนเกิดน้ำท่า โดยในการศึกษากำหนดลักษณะการเกิดให้เป็นลักษณะคงที่ตลอดช่วงเวลา ซึ่งในกรณีนี้จะต้องกำหนดความหนาต่ำสุดที่ทำให้เกิดน้ำท่า (0.8 ซม.)
	Part 3 Soil Evaporation	กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การระเหย เมื่อเกิดการเจ็มนองของน้ำ (ค่าสัมประสิทธิ์การระเหยเท่ากับ 1.00)
	Part 4 Vertical Discretization of Soil Profile	ในส่วนนี้จะต้องทำการกำหนดการแบ่งชั้นดินในการวิเคราะห์ โดยในการศึกษานี้จะแบ่งออกเป็น 4 ชั้น โดย 3 ชั้นแรกชั้นละ 50 ซม. และชั้นสุดท้าย 200 ซม. ตามการเก็บตัวอย่างดินภาคสนาม และเพื่อให้ครอบคลุมถึงความลึกของรากพืชสูงสุด
	Part 5 Soil Hydraulic Function	ในส่วนนี้จะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของชั้นดินแต่ละชั้น โดยอาศัยพารามิเตอร์จากฐานข้อมูลของแบบจำลอง และปรับแก้ในเข้ากับข้อมูลจากภาคสนาม ดังตารางที่ 2-15
	Part 6 Hysteresis of Soil Water Retention Function	เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาฮิสเทอรีซิสของสมการการกักเก็บน้ำในดิน ดังนั้น ในส่วนนี้จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า
	Part 7 Maximum Rooting Depth	กำหนดค่าความลึกของรากพืชสูงสุดเท่ากับ 350 ซม.

ส่วนหลัก	ส่วนย่อย	รายละเอียด
	Part 8 Preferential Flow Due to Macro-pores	เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาการไหลในรูพรุนขนาดเล็ก ดังนั้น ในส่วนนี้จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า
	Part 9 Snow and Frost	เนื่องจากในพื้นที่ศึกษานี้ไม่มีการเกิดหิมะและการเยือกแข็งของน้ำ ดังนั้น ในส่วนนี้จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า
	Part 10 Numerical Solution of Richards's Equation for Soil Water Flow	เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาการไหลของสารละลาย ดังนั้น ในส่วนนี้จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า

ตารางที่ 2-17 (ต่อ)

ส่วนหลัก	ส่วนย่อย	รายละเอียด
ส่วนการระบายน้ำด้านข้าง (Lateral Drainage Section)	–	เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาการไหลทางด้านข้าง ดังนั้น ในส่วนนี้จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า
ส่วนขอบข่ายด้านล่าง (Bottom Boundary Section)	–	ในส่วนนี้จะทำการกำหนดลักษณะของขอบข่ายการจำลองด้านล่าง โดยเลือกจากรูปแบบดังต่อไปนี้ (1) Prescribe groundwater level (2) Prescribe bottom flux (3) Calculate bottom flux from hydraulic head of deep aquifer (4) Calculate bottom flux as function of groundwater level (5) Prescribe soil water pressure head of bottom compartment (6) Bottom flux equals zero (7) Free drainage of soil profile (8) Free outflows at soil-air interface โดยในการศึกษานี้จะเลือกเป็นรูปแบบที่ 8 Free outflows at soil-air interface เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ใกล้เคียงกับการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้ Lysimeter ซึ่งจะเกิดการเติมน้ำ

ส่วนหลัก	ส่วนย่อย	รายละเอียด
		ใต้ดิน เมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้นไปจนถึงจุดอิ่มตัว

ตารางที่ 2-17 (ต่อ)

ส่วนหลัก	ส่วนย่อย	รายละเอียด
ส่วนการแผ่ความร้อน (Heat Flow Section)	Part 1 Specify Whether Simulation Method	เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาการแผ่ความร้อน ดังนั้น ในส่วนนี้จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า
	Part 2 Heat Flow Calculation	
	Part 3 Analytical Method	
	Part 4 Numerical Method	
ส่วนการไหลของสารละลาย (Solute Section)	Part 1 Specify Whether Simulation Includes Solute Transport	เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาการไหลของสารละลาย ดังนั้น ในส่วนนี้จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า
	Part 2 Boundary and Initial Condition	
	Part 3 Miscellaneous Parameters as Function of Soil Depth	
	Part 4 Diffusion Constant	
	Solute Uptake by Roots	
	Part 5 Adsorption	
	Part 6 Decomposition	
	Part 7 Solute Residence Time in the Saturated Zone	

2.4.2.2 การดำเนินการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยแบบจำลอง SWAP

การดำเนินการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยแบบจำลอง SWAP ข้อมูลทั้งหมดจะต้องถูกจัดเตรียมให้อยู่ในรูปแบบตามที่แบบจำลองกำหนดดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.4.2.1 โดยข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการจำลองจะแบ่งออกเป็น 3 พื้นที่ตามชนิดของดินหลักซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นที่ ได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทราย และเนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะการใช้ที่ดินเพื่อการเกษตรเป็นหลัก ดังนั้นพืชที่ใช้เป็นตัวแทนจึงถูกเลือกตามลักษณะการเพาะปลูกที่สัมพันธ์กับชนิดของดิน ได้แก่ ข้าว อ้อย และผักสวนครัวตามลำดับ ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินรายปีนั้นจะถูกคำนวณโดยใช้สัดส่วนพื้นที่ของดินแต่ละชนิดตามตารางที่ 2-18 เพื่อหาอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษาในแต่ละปี

ตารางที่ 2-18 สรุปรายการข้อมูลสำหรับการดำเนินการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยแบบจำลอง SWAP

ชนิดของดิน	ชนิดของพืช	สัดส่วนพื้นที่
ดินเหนียว	ข้าว	42.88%
ดินร่วน	อ้อย	42.83%
ดินร่วนปนทราย	ผักสวนครัว	14.29%

2.3.2.3 อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากการจำลอง SWAP

ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP แสดงผลแบบต่อเนื่องแยกตามชนิดดินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560 แสดงผลในตารางที่ 2-19 ถึงตารางที่ 2-21 และภาพที่ 2-29 ถึงภาพที่ 2-31 ซึ่งพบว่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินผันแปรค่าตามชนิดดินกล่าวคือ อัตราการเติมน้ำใต้ดินของดินเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทรายมีค่าเฉลี่ยรายปี 24.25, 198.45 และ 242.51 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยอัตราการเติมน้ำใต้ดินเฉลี่ยของดินเหนียวมีค่าน้อยที่สุดตามคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดิน เปอร์เซ็นต์อัตราการเติมน้ำใต้ดินตลอดช่วงฤดูฝนเฉลี่ยของดินร่วนปนทรายระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมอยู่ที่ 64.65% ซึ่งสูงกว่าในช่วงฤดูแล้งระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายนที่มีเปอร์เซ็นต์อัตราการเติมน้ำใต้ดินอยู่ที่ 35.35% เนื่องมาจากปัจจัยฝนที่มีการเติมน้ำไปในชั้นน้ำใต้ดินอย่างไรก็ดี ผลการจำลองพบว่าเปอร์เซ็นต์อัตราการเติมน้ำใต้ดินในช่วงฤดูแล้งของดินเหนียวและดินร่วนสูงกว่าในช่วงฤดูฝน ซึ่งอาจเป็นผลจากคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดิน และข้อจำกัดของข้อมูลนำเข้าของการจำลองในแบบจำลอง SWAP ที่เป็นลักษณะแบบ 1 มิติ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์อัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปีเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่จากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560 โดยอาศัยหลักการถ่วงค่าน้ำหนักตามสัดส่วนพื้นที่ตามชนิดดินเพียง 3 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทราย ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์พื้นที่เท่ากับ 42.88%, 42.83% และ 14.29% ตามลำดับ พบว่า อัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปีเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่มีค่าเท่ากับ 128.81 มิลลิเมตรต่อปี ดังแสดงผลในตารางที่ 2-22

ตารางที่ 2-19 ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินของดินเหนียวโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560

ปี	อัตราการเติมน้ำใต้ดินของดินเหนียว (มม.ต่อเดือน)												
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ต่อปี
2543	38.45	15.14	11.05	8.15	6.82	5.74	6.80	8.10	7.63	7.10	7.65	9.62	132.25
2544	8.82	6.74	6.36	5.31	4.80	4.13	3.81	3.45	3.04	2.87	2.57	2.46	54.36
2545	2.31	2.02	2.25	2.21	2.31	2.24	2.28	2.35	2.91	4.75	7.54	11.83	45.00
2546	12.86	9.24	8.19	6.57	5.78	4.88	4.46	4.31	5.11	7.28	9.77	11.17	89.62
2547	9.42	7.23	6.49	5.39	4.86	4.16	3.84	3.47	3.05	2.89	2.57	2.47	55.84
2548	2.29	1.93	2.01	1.83	1.78	1.63	1.59	1.51	1.39	1.37	1.26	1.25	19.84
2549	1.19	1.03	1.10	1.01	1.01	0.94	0.94	0.89	0.84	0.84	0.78	0.78	11.35
2550	0.75	0.66	0.71	0.66	0.67	0.62	0.62	0.61	0.56	0.57	0.54	0.54	7.51
2551	0.52	0.48	0.49	0.47	0.47	0.44	0.45	0.43	0.41	0.41	0.39	0.39	5.35
2552	0.38	0.34	0.36	0.34	0.35	0.33	0.33	0.32	0.30	0.31	0.29	0.30	3.95

ตารางที่ 2-19 (ต่อ)

ปี	อัตราการเติมน้ำใต้ดินของดินเหนียว (มม.ต่อเดือน)												
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ต่อปี
2553	0.29	0.25	0.27	0.26	0.27	0.24	0.25	0.25	0.23	0.23	0.23	0.22	2.99
2554	0.22	0.19	0.21	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.17	0.17	2.29
2555	0.17	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14	1.78
2556	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	1.38
2557	0.10	0.09	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	1.09
2558	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.85
2559	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.65
2560	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.48
รายฤดูเฉลี่ย	ฤดูแล้งระหว่าง พ.ย.-เม.ย. 15.15 มม. (62.48%)				ฤดูฝนระหว่าง พ.ค.-ต.ค. 9.10 มม. (37.52%)						ฤดูแล้งระหว่าง พ.ย.-เม.ย. 15.15 มม. (62.48%)		รายปีเฉลี่ย 24.25 มม.

ตารางที่ 2-20 ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินของดินร่วนโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560

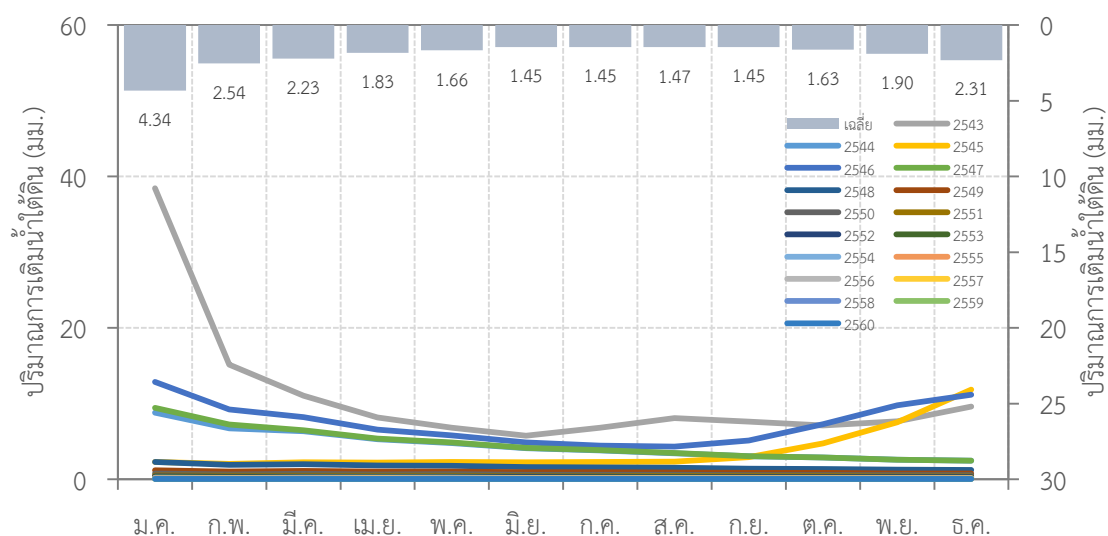
ปี	อัตราการเติมน้ำใต้ดินของดินร่วน (มม.ต่อเดือน)												
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ต่อปี
2543	88.35	27.84	17.35	10.64	7.26	5.00	4.57	4.98	4.88	4.73	51.65	28.08	255.33
2544	15.36	8.46	5.77	3.18	1.60	0.50	0.01	0.00	0.00	20.68	84.48	29.18	169.22
2545	15.98	8.85	6.07	3.38	1.76	0.60	0.03	0.00	0.00	10.15	28.88	46.77	122.47
2546	27.28	14.35	9.87	5.82	3.52	1.89	0.91	1.18	9.00	72.25	45.35	26.41	217.83
2547	14.88	8.50	5.60	3.11	1.57	0.48	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.15
2548	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.33	29.74	66.07
2549	16.79	9.49	6.64	3.79	2.09	0.85	0.13	0.00	0.00	0.00	1.14	12.39	53.31
2550	11.02	6.72	4.65	2.46	1.01	0.09	0.00	4.48	22.68	59.40	61.87	28.66	203.04
2551	15.81	8.93	5.81	3.23	1.67	0.57	0.02	0.00	0.00	2.23	60.73	29.43	128.43
2552	17.07	9.98	7.12	4.15	2.32	1.01	0.21	0.00	0.00	0.00	59.53	28.36	129.75
2553	15.23	8.30	5.58	3.01	1.45	0.37	0.00	19.21	150.38	186.68	84.59	28.93	503.73
2554	15.75	8.89	6.51	4.11	2.68	1.52	0.79	0.17	64.27	82.29	32.99	21.50	241.47
2555	13.07	7.69	5.06	2.75	1.30	0.26	0.00	0.00	0.00	1.72	74.20	71.77	177.82
2556	27.82	14.20	9.66	5.61	3.29	1.65	0.68	0.05	0.00	129.55	91.04	43.43	326.98
2557	24.34	12.64	8.55	4.88	2.78	1.29	0.40	0.00	0.00	83.74	90.58	42.71	271.91
2558	25.15	13.42	9.18	5.32	3.12	1.57	0.64	0.04	0.00	16.46	61.37	29.86	166.13
2559	17.51	10.38	7.00	4.04	2.23	0.94	0.17	0.00	0.00	88.48	85.91	30.31	246.97
2560	17.03	9.64	6.79	3.91	2.18	0.94	0.37	4.94	32.25	70.08	64.72	44.74	257.59

ตารางที่ 2-20 (ต่อ)

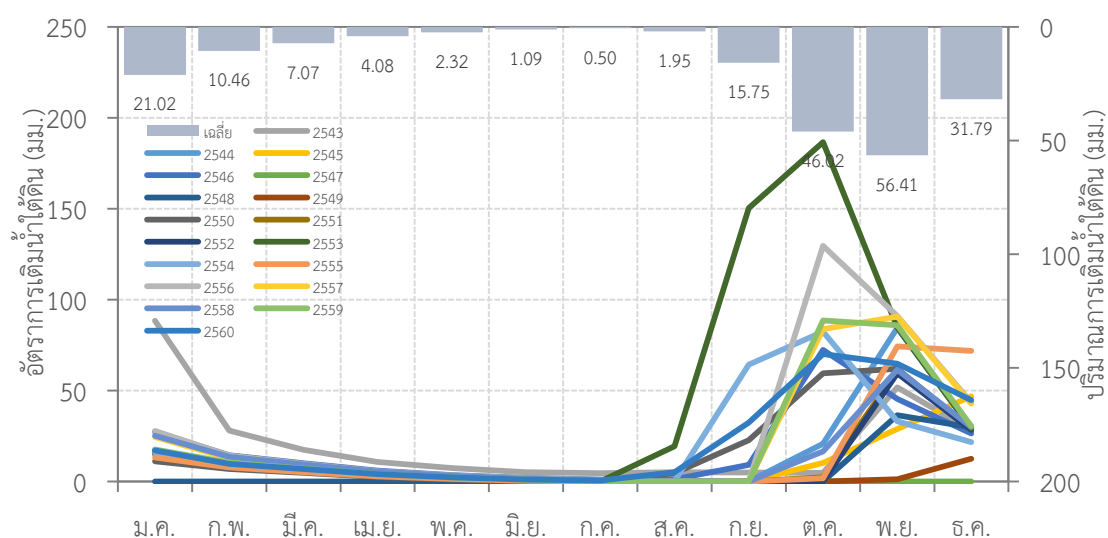
ปี	อัตราการเติมน้ำใต้ดินของดินร่วน (มม.ต่อเดือน)												
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ต่อปี
ราย ฤดู เฉลี่ย	ฤดูแล้งระหว่าง พ.ย.-เม.ย. 130.83 มม. (65.92%)				ฤดูฝนระหว่าง พ.ค.-ต.ค. 67.63 มม. (34.08%)						ฤดูแล้งระหว่าง พ.ย.-เม.ย. 67.63 มม. (65.92%)		รายปีเฉลี่ย 198.46 มม.

ตารางที่ 2-21 ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินของดินร่วนปนทรายโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี
พ.ศ. 2543-2560

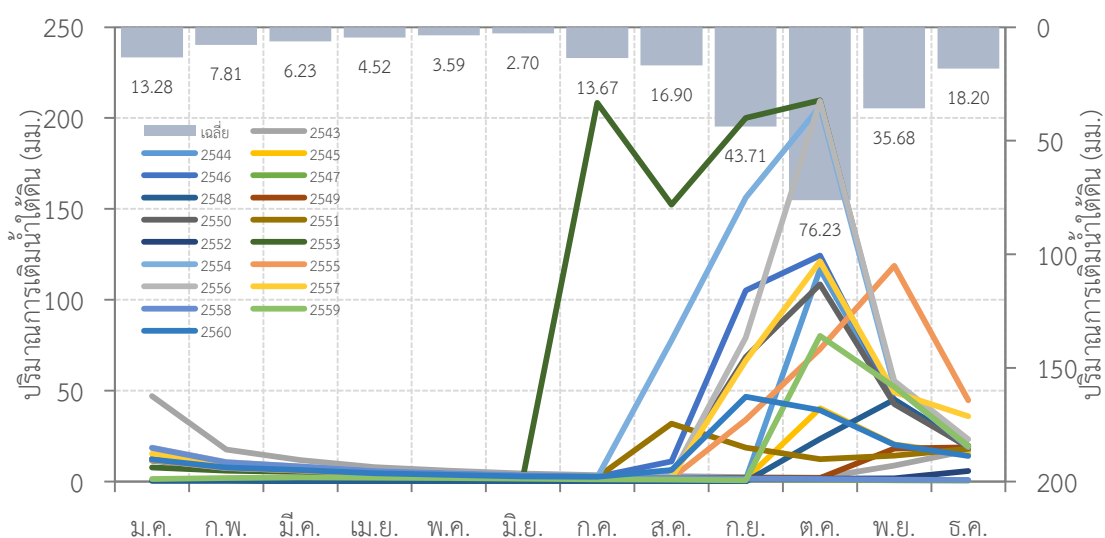
ปี	อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (มม.ต่อเดือน)												
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ต่อปี
2543	47.01	17.59	11.77	7.90	5.98	4.39	3.53	2.88	2.36	2.10	8.66	16.94	131.11
2544	11.34	7.27	5.98	4.39	3.50	2.63	2.13	1.65	1.24	116.81	45.03	18.90	220.87
2545	11.69	7.41	6.09	4.45	3.55	2.66	2.16	1.66	1.27	40.29	20.38	15.07	116.68
2546	12.26	8.61	7.28	5.36	4.28	3.23	2.61	11.02	105.16	124.38	44.44	18.69	347.32
2547	11.56	7.56	5.96	4.36	3.48	2.62	2.11	1.64	1.22	0.95	0.69	0.50	42.65
2548	0.36	0.24	0.19	0.12	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	23.39	44.99	19.70	89.03
2549	12.45	7.97	6.56	4.81	3.83	2.89	2.35	2.04	1.90	1.91	18.10	18.78	83.59
2550	11.69	7.42	6.09	4.45	3.55	2.68	2.15	3.94	68.41	108.39	42.52	19.00	280.29
2551	11.82	7.73	6.11	4.46	3.56	2.68	2.17	31.80	18.59	12.21	14.13	17.92	133.18
2552	12.00	7.73	6.38	4.68	3.73	2.82	2.27	1.83	1.57	1.51	1.67	5.81	52.00
2553	7.71	5.90	5.18	3.90	3.17	2.42	208.31	152.25	200.14	209.75	53.24	19.12	871.09
2554	11.71	7.39	6.07	4.44	3.53	2.67	2.16	77.63	156.25	206.44	52.21	19.01	549.51
2555	11.67	7.59	5.99	4.37	3.49	2.62	2.12	1.63	33.96	72.91	118.69	44.74	309.78
2556	18.61	10.63	8.29	5.87	4.60	3.42	2.76	2.96	79.14	209.48	55.18	23.21	424.15
2557	15.34	9.48	7.58	5.44	4.28	3.20	2.58	2.01	66.57	121.10	49.07	35.90	322.55
2558	18.39	10.53	8.20	5.81	4.55	3.39	2.72	2.12	1.59	1.26	0.93	0.85	60.34
2559	1.38	1.86	2.21	2.02	1.83	1.48	1.24	0.97	0.70	80.05	52.02	19.42	165.18
2560	12.03	7.61	6.25	4.55	3.63	2.73	2.60	6.22	46.69	39.22	20.25	14.01	165.79
ราย ฤดู เฉลี่ย	ฤดูแล้งระหว่าง พ.ย.-เม.ย. 85.72 มม. (35.35%)				ฤดูฝนระหว่าง พ.ค.-ต.ค. 156.79 มม. (64.65%)						ฤดูแล้งระหว่าง พ.ย.-เม.ย. 85.72 มม. (35.35%)		รายปี เฉลี่ย 242.51 มม.



ภาพที่ 2-29 การกระจายตัวของอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายเดือนของดินเหนียวจากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560



ภาพที่ 2-30 การกระจายตัวของอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายเดือนของดินร่วนจากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560



ภาพที่ 2-31 การกระจายตัวของอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายเดือนของดินร่วนปนทรายจากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560

ตารางที่ 2-22 อัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปีเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่จากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560

ปี	อัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปี (ชม./ปี)			อัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปีเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่	
	ดินเหนียว	ดินร่วน	ดินร่วนปนทราย	ชม./ปี	มม./ปี
พื้นที่ (ตร.กม.)	646,411,521	645,536,673	215,408,393	1,507,356,587	
เปอร์เซ็นต์พื้นที่	42.88	42.83	14.29	100.00	
2543	13.22	25.53	13.11	18.48	184.76
2544	5.44	16.92	22.09	12.74	127.36
2545	4.50	12.25	11.67	8.84	88.44
2546	8.96	21.78	34.73	18.13	181.33
2547	5.58	3.41	4.27	4.46	44.63
2548	1.98	6.61	8.90	4.95	49.52
2549	1.14	5.33	8.36	3.97	39.66
2550	0.75	20.30	28.03	13.02	130.21
2551	0.53	12.84	13.32	7.63	76.30
2552	0.39	12.98	5.20	6.47	64.69
2553	0.30	50.37	87.11	34.15	341.48
2554	0.23	24.15	39.43	16.08	160.76
2555	0.18	17.78	30.98	12.12	121.19
2556	0.14	32.70	42.42	20.13	201.26
2557	0.11	27.19	32.25	16.30	163.00
2558	0.08	16.61	6.03	8.01	80.09
2559	0.07	24.70	16.52	12.97	129.69
2560	0.05	25.76	16.58	13.42	134.23
ค่าเฉลี่ย				12.88	128.81

2.5 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS

2.5.1 การจัดเตรียมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้เป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS จะประกอบด้วย 5 ประเภทหลัก ได้แก่ (1) ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ (2) ข้อมูลทางอุทกนิยมิวิทยา (3) ข้อมูลการใช้ที่ดิน (4) ข้อมูลชนิดดิน และ (5) ข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2-23 ดังนี้

ตารางที่ 2-23 ข้อมูลที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS

ประเภทที่	ชนิดข้อมูล	ข้อมูลนำเข้า	แหล่งข้อมูล	ระยะเวลา
1	ข้อมูลทางภูมิศาสตร์	แบบจำลองความสูงเชิงเลข	USGS	พ.ศ. 2554
		ความลาดชัน		
2	ข้อมูลทางอุทกนิยมิวิทยา	ข้อมูลฝน	TMD และ RID	พ.ศ. 2543–2560
		ข้อมูลอุณหภูมิต		
		ข้อมูลการระเหยคายน้ำเบื้องต้น		
		ข้อมูลความเร็วลม		
3	ข้อมูลการใช้ที่ดิน	การใช้ที่ดินในพื้นที่	LDD	พ.ศ. 2554
		พารามิเตอร์ของการใช้ที่ดินแต่ละประเภท		
4	ข้อมูลชนิดดิน	ชนิดของดินในพื้นที่	LDD	พ.ศ. 2554
		พารามิเตอร์ของดินแต่ละชนิด		
5	ข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน	ข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน	DGR	พ.ศ. 2543–2560

หมายเหตุ : USGS = กรมสำรวจธรณีวิทยาแห่งสหรัฐอเมริกา TMD = กรมอุทกนิยมิวิทยา RID = กรมชลประทาน
LDD = กรมพัฒนาที่ดิน และ DGR = กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

2.5.1.1 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์

ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน WETSPASS ได้แก่ แบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) และความลาดชัน (Slope) ซึ่งจะถูกคำนวณจากแบบจำลองความสูงเชิงเลข โดยใช้โปรแกรม Arc-GIS ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลขที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองนี้มีความละเอียดของข้อมูล (Resolution) อยู่ที่ 30x30 เมตร เป็นข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลขที่สามารถเข้าถึงได้จากทางฐานข้อมูลของกรมสำรวจธรณีวิทยาแห่งสหรัฐอเมริกา (USGS, The United States Geological Survey) ซึ่งข้อมูลนี้จะเป็นตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการจำลองการเติมน้ำใต้ดิน

2.5.1.2 ข้อมูลทางอุตุนิยมิวิทยา

ข้อมูลทางอุตุนิยมิวิทยาที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน WETSPASS จะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลการกระจายเชิงพื้นที่ (Spatial Distribution Data) เช่นเดียวกับข้อมูลทางภูมิศาสตร์ที่มีความละเอียด 30x30 เมตร โดยมีข้อมูลที่จำเป็นทั้งสิ้น 4 ชนิด ได้แก่ (1) ข้อมูลฝน (2) ข้อมูลอุณหภูมิ (3) ข้อมูลการระเหยคายน้ำเบื้องต้น และ (4) ข้อมูลความเร็วลม ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2-24 ดังนี้

ตารางที่ 2-24 ข้อมูลทางอุตุนิยมิวิทยาที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน WETSPASS

ชนิดของข้อมูล	ระยะเวลา	หน่วย	แหล่งข้อมูล
ข้อมูลฝน	รายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560	มิลลิเมตร (มม.)	TMD และ RID
ข้อมูลอุณหภูมิ	รายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560	องศาเซลเซียส (°C)	TMD
ข้อมูลการระเหยคายน้ำเบื้องต้น	รายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560	มิลลิเมตร (มม.)	วิเคราะห์จากข้อมูลอุณหภูมิ
ข้อมูลความเร็วลม	รายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560	เมตรต่อวินาที	TMD

2.5.1.2.1 ข้อมูลฝน

ข้อมูลปริมาณฝนในพื้นที่ศึกษานี้ถูกรวบรวมจาก 2 หน่วยงาน ได้แก่ กรมอุตุนิยมิวิทยา (TMD) และกรมชลประทาน (RID) โดยจะถูกคัดเลือกจากสถานีภายในพื้นที่ศึกษา และนอกพื้นที่ศึกษาที่อยู่ใกล้กับพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยสถานีตรวจวัดน้ำฝนรวมทั้งสิ้น 12 สถานี จากทั้ง 2 หน่วยงาน ดังแสดงในตารางที่ 2-25 ดังนี้

ตารางที่ 2-25 รายชื่อสถานีตรวจวัดน้ำฝน

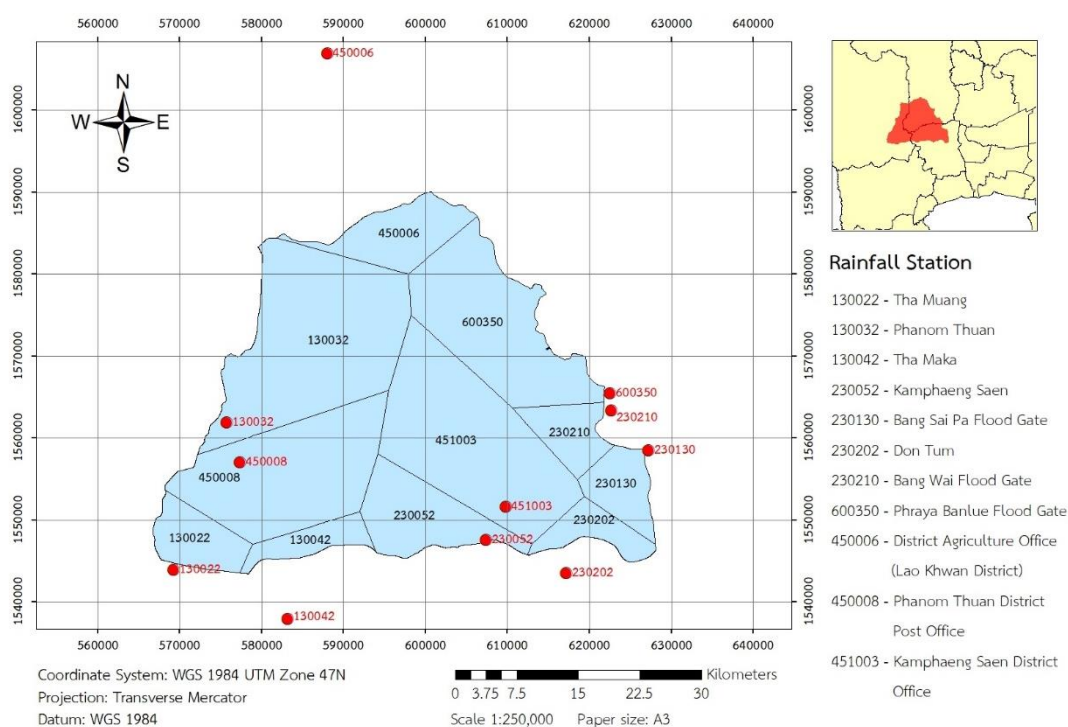
ลำดับที่	แหล่งข้อมูล	จังหวัด	ชื่อสถานี	รหัสสถานี	ค่าพิกัดสถานี	
					X	Y
1	RID	กาญจนบุรี	อ.ท่าม่วง	130022	569275	1543918
2	RID	กาญจนบุรี	อ.พนมทวน	130032	575733	1561909
3	RID	กาญจนบุรี	อ.ท่ามะกา	130042	583187	1537907
4	RID	นครปฐม	อ.กำแพงแสน	230052	607397	1547583
5	RID	นครปฐม	ประตูระบายน้ำบางไทรป่า (SUP.52) อ.บางเลน	230130	627204	1558490
6	RID	นครปฐม	อ.ดอนตูม	230202	617166	1543508
7	RID	นครปฐม	ประตูระบายน้ำบางหวาย	230210	622622	1563383

ตารางที่ 2-25 (ต่อ)

ลำดับ ที่	แหล่งข้อมูล	จังหวัด	ชื่อสถานี	รหัสสถานี	ค่าพิกัดสถานี	
					X	Y
8	RID	สุพรรณบุรี	ประตูระบายน้ำพระยา บรรลือ (SUP.41)	600350	622492	1565441
9*	TMD	กาญจนบุรี	ที่ว่าการอำเภอท่ามะกา	450004	584637	1534962
10	TMD	กาญจนบุรี	สำนักงานเกษตรอำเภอเลา ขวัญ	450006	587987	1606869
11	TMD	กาญจนบุรี	ที่ทำการโปรชนีย์ อ.พนม ทวน	450008	577367	1557060
12	TMD	นครปฐม	ที่ว่าการอำเภอกำแพงแสน	451003	609779	1551649

หมายเหตุ : 9* สถานีที่ว่าการอำเภอท่ามะกาถูกใช้เพื่อหากระจายตัวของฝนเท่านั้น เนื่องจากผลการวิเคราะห์กระจายตัว
ของฝนของสถานีนี้อยู่นอกพื้นที่ศึกษาจึงไม่ถูกนำมาคำนวณในแบบจำลองด้วย

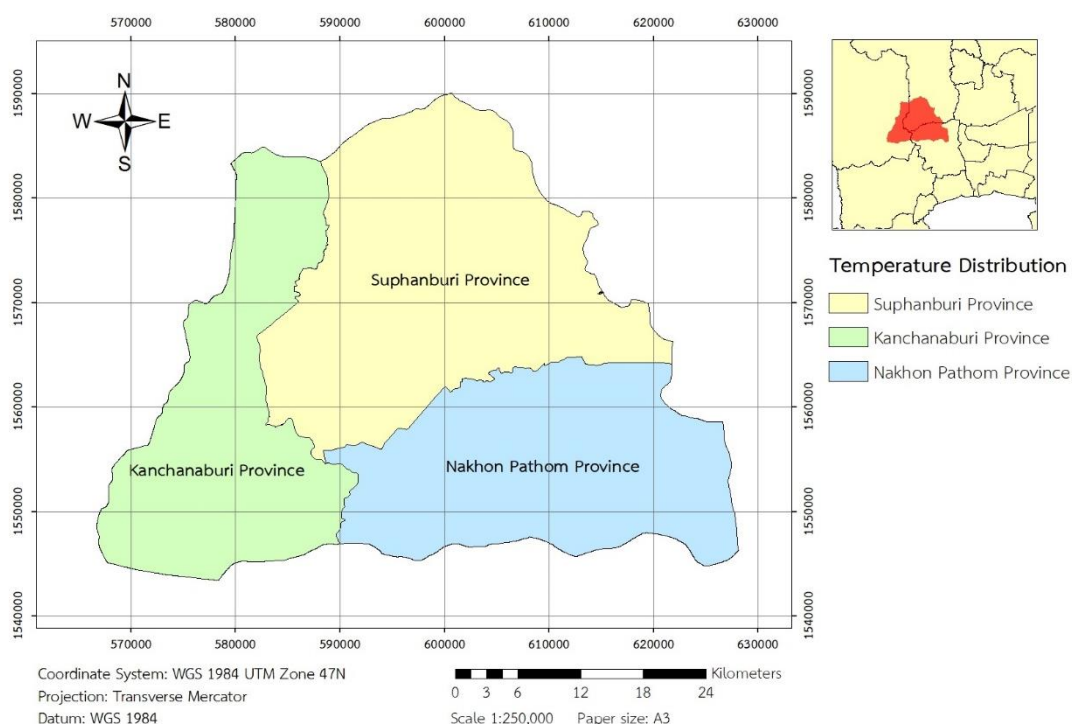
ข้อมูลปริมาณฝนรายเดือนถูกนำมาใช้ในการจำลองการเติมน้ำใต้ดิน โดยใช้แบบจำลอง WETSPASS โดยข้อมูลปริมาณฝนส่วนที่ขาดหายไปจะถูกต่อเติมเข้ามาด้วยวิธี Distance Power Method ซึ่งเป็นวิธีการที่อาศัยข้อมูลจากสถานีใกล้เคียงในการประมาณข้อมูลส่วนที่ขาดหายไปของสถานี นั้น ๆ จากนั้นข้อมูลฝนที่ถูกต่อเติมข้อมูลส่วนที่ขาดหายของทั้ง 12 สถานี จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาการกระจายตัวของฝนในแต่ละเดือน โดยใช้วิธี Thiessen Polygon ดังภาพที่ 2-32 ซึ่งการกระจายตัวและปริมาณฝนรายเดือนของทั้ง 12 สถานี ในพื้นที่ศึกษาจะถูกนำไปใช้เป็นปริมาณน้ำเข้าหลักของแบบจำลอง WETSPASS ในพื้นที่ศึกษาตามลักษณะการกระจายตัว ยกเว้นสถานีที่ว่าการอำเภอท่ามะกา (450004) ที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของฝนเท่านั้น เนื่องจากการกระจายตัวของสถานีนี้อยู่นอกพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 2-32 การกระจายตัวของฝนในพื้นที่ศึกษาโดยใช้วิธี Thiessen Polygon

2.5.1.2.2 ข้อมูลอุณหภูมิจึงหวัด

ข้อมูลอุณหภูมิจึงหวัดรายเดือนถูกรวบรวมจากกรมอุตุนิยมวิทยา (TMD) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของอุณหภูมิจึงหวัดรายเดือน ดังนั้น การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิจึงหวัดรายเดือนในพื้นที่ศึกษาจึงถูกแบ่งออกตามพื้นที่จังหวัด โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิจึงหวัดรายเดือนเป็นตัวแทนการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลอุณหภูมิจึงหวัดรายเดือนของ 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดสุพรรณบุรี และจังหวัดนครปฐม โดยข้อมูลอุณหภูมิจึงหวัดส่วนที่ขาดหายไปจะถูกต่อเติมด้วยค่าของอุณหภูมิจึงหวัดรายเดือนของจังหวัดนั้น ๆ ที่ถูกคำนวณจากการนำค่าของอุณหภูมิจึงหวัดรายเดือนของทุกปีในช่วงปี พ.ศ. 2543-2560 ที่มีข้อมูลมาเฉลี่ยโดยแบ่งออกเป็นแต่ละเดือนของแต่ละจังหวัด ดังภาพที่ 2-33



ภาพที่ 2-33 การกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ศึกษา

2.5.1.2.3 ข้อมูลการระเหยคายน้ำเบื้องต้น

ข้อมูลปริมาณการระเหยคายน้ำเบื้องต้น (Potential Evapotranspiration, PET) ถูกประมาณขึ้นโดยวิธีของ Thornthwaite ในลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ในแบบจำลอง SWAP โดยการกระจายตัวของปริมาณการระเหยคายน้ำเบื้องต้นในพื้นที่ศึกษาถูกแบ่งตามการกระจายตัวของอุณหภูมิและแบ่งออกตามพื้นที่ 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดสุพรรณบุรี และจังหวัดนครปฐม

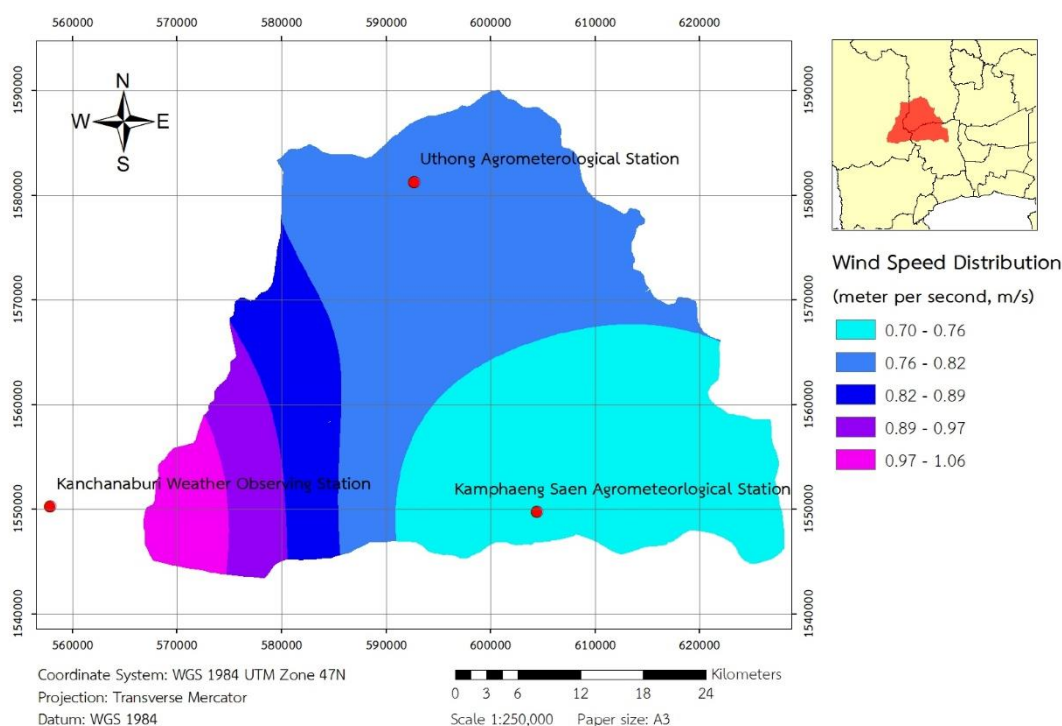
2.5.1.2.4 ข้อมูลความเร็วลม

ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยถูกรวบรวมจากกรมอุตุนิยมวิทยา (TMD) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลความเร็วลมจากสถานีอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ศึกษาและนอกพื้นที่ศึกษาที่ใกล้เคียง ได้แก่ สถานีอุทอง สถานีกำแพงแสน และสถานีกาญจนบุรี โดยมีรายละเอียดสถานีดังที่แสดงในตารางที่ 2-26 โดยข้อมูลความเร็วลมส่วนที่ขาดหายไปจะถูกต่อเติมด้วยค่าของความเร็วลมรายเดือนของสถานีนั้น ๆ ที่ถูกคำนวณจากการนำค่าของความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนของทุกปีในช่วงปี พ.ศ. 2543-2560 ที่มีข้อมูล มาเฉลี่ยโดยแบ่งออกเป็นแต่ละเดือนของแต่ละสถานี

ตารางที่ 2-26 รายชื่อสถานีอุตุนิยมวิทยา

ลำดับ	จังหวัด	ชื่อสถานี	หมายเลขสถานี	ค่าพิกัดสถานี	
				X	Y
1	สุพรรณบุรี	อุทุมพร	0027	592663	1581261
2	นครปฐม	กำแพงแสน	0028	604388	1549783
3	กาญจนบุรี	กาญจนบุรี	0031	557890	1550280

ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยของทั้ง 3 สถานี จะถูกใช้เพื่อหาการกระจายตัวของความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ โดยใช้การประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Spatial Interpolation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ข้อมูลของสถานีที่ทราบค่าในการประมาณค่าในพื้นที่ที่ยังไม่ทราบค่า การประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่สามารถทำได้โดยหลายวิธี โดยวิธีการคำนวณค่าระยะทางกลับโดยน้ำหนัก (Inverse Distance Weighting) ถูกเลือกใช้ในการหาการกระจายตัวของความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ศึกษา ซึ่งวิธีการนี้มีความเหมาะสมกับกรณีที่มีจำนวนสถานีในพื้นที่น้อย แต่ไม่สามารถประมาณค่าที่สูงหรือต่ำกว่าค่าเริ่มต้นได้ ดังภาพที่ 2-34



ภาพที่ 2-34 การกระจายตัวของความเร็วลมเฉลี่ยเดือนกันยายนปี พ.ศ. 2553 ในพื้นที่ศึกษาโดยใช้วิธี IDW

2.5.1.3 ข้อมูลการใช้ที่ดิน

ข้อมูลการใช้ที่ดินประจำปี พ.ศ. 2554 ถูกรวบรวมจากกรมพัฒนาที่ดิน (LDD) ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนการใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษาประกอบด้วยการใช้ที่ดินทั้งสิ้น 26 ประเภท ตามการจำแนกของกรม

พัฒนาที่ดินดังที่แสดงในดั่งภาพที่ 2-34 และตารางที่ 2-27 โดยที่การใช้ที่ดินแต่ละประเภทจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS ทั้งสิ้น 9 พารามิเตอร์ ได้แก่ (1) ชนิดของพื้นผิว (Land Cover) (2) สัดส่วนพื้นผิวปกคลุมดิน (Land Cover Fraction) (3) ความลึกของรากพืช (Root Depth) (4) ค่าดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index, LAI) (5) ความต้านทานของปากใบสุด (Minimal Stomatal Resistance) (6) ความสูงของพืช (Vegetation Height) (7) สัมประสิทธิ์ของความขรุขระ (Roughness Coefficient, n) (8) แฟกเตอร์พื้นผิว (Land Factor) และ (9) ความต้านทานอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Resistance) โดยมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

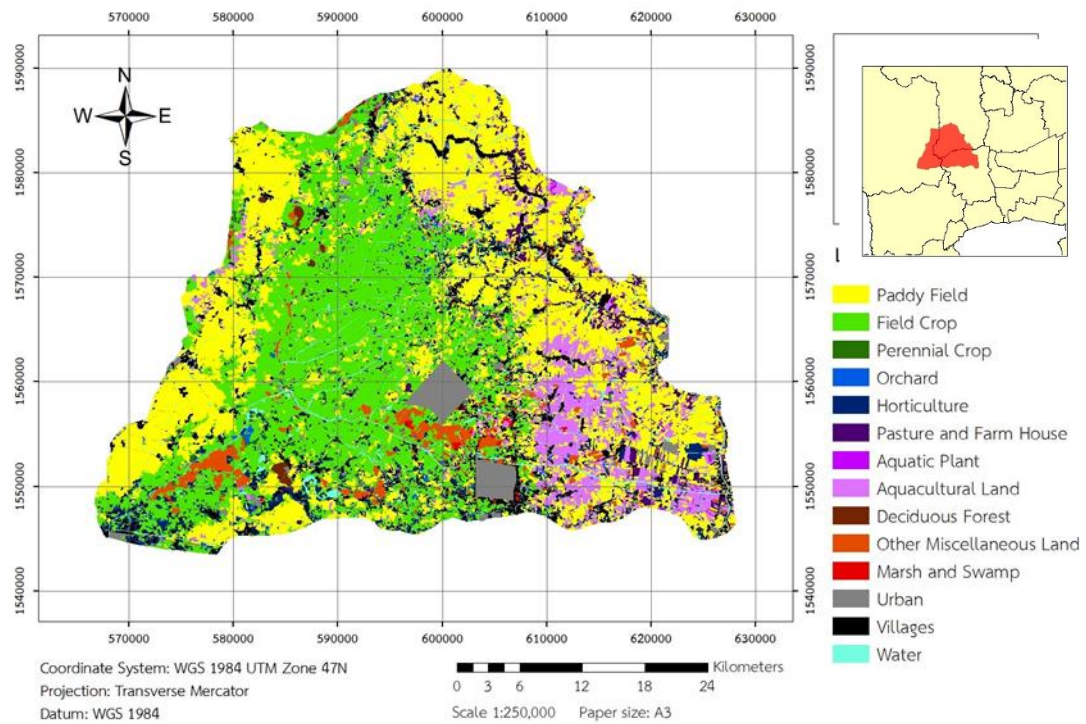
ตารางที่ 2-27 รายละเอียดพารามิเตอร์การใช้ที่ดิน

ลำดับ ที่	พารามิเตอร์	สัญลักษณ์สำหรับ แบบจำลอง	รายละเอียด	แหล่งข้อมูล
1	ชนิดของ พื้นผิว	RUNOFF_VEG	ชนิดของพื้นผิวจะถูกกำหนดด้วย การใช้ที่ดินในพื้นที่ เช่น พื้นผิว คอนกรีต พื้นผิวที่ปกคลุมด้วย หญ้า และพื้นผิวที่ปกคลุมด้วย พืชไร่ เป็นต้น	กำหนดตามการใช้ ที่ดิน
2	สัดส่วน พื้นผิวปก คลุมดิน	VEG_AREA, BARE_AREA, IMP_AREA, OPENW_AREA	สัดส่วนพื้นผิวปกคลุมดินจะเป็น สัดส่วนกันระหว่าง 4 พื้นผิว ได้แก่ พื้นที่เพาะปลูก พื้นที่ดิน ว่างเปล่า พื้นที่ที่บ้น้ำ และพื้นที่ แหล่งน้ำเปิด โดยมีผลรวมของทั้ง 4 พื้นผิวเท่ากับ 1 สำหรับการใช้ ที่ดินแต่ละชนิด	กำหนดตามชนิด ของพื้นผิว
3	ความลึก ของรากพืช	ROOT_DEPTH	ความลึกของรากพืช (เมตร) จะ ถูกกำหนดตามชนิดของพืชที่ปก คลุมพื้นผิว โดยพื้นผิวที่ไม่มีพืช ปกคลุม เช่น พื้นที่ผิวคอนกรีต และพื้นที่ดินว่างเปล่า จะถูก กำหนดให้เป็น 0	Foxx et al., 1984; Lesschen et al., 2004; USDA, 1997; USDA, 2016
4	ค่าดัชนีพื้นที่ ใบ	LAI	ค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) จะถูก กำหนดตามชนิดของพื้นผิว (1) โดยพื้นที่ที่มีพื้นผิวแบบเดียวกัน จะกำหนดให้มีค่า LAI เท่ากัน	ประสิทธิ์ ชุนสนิท และ สุนทรี ยิ่ง ชัชวาลย์, 2011; สำเร็จ ป่านอุทัย และคณะ, ไม่ ปรากฏปีที่พิมพ์

ตารางที่ 2-27 (ต่อ)

ลำดับ ที่	พารามิเตอร์	สัญลักษณ์สำหรับ แบบจำลอง	รายละเอียด	แหล่งข้อมูล
5	ความ ต้านทาน ของปากใบ ต่ำสุด	MIN_STOM	ความต้านทานของปากใบสูงสุดจะ ถูกกำหนดตามชนิดของพืชที่ปก คลุมพื้นผิว	กำหนดตามชนิด ของพื้นผิว โดย อาศัยค่าเริ่มต้น จากแบบจำลอง
6	ความสูงของ พืช	VEG_HEIGHT	ความสูงของพืชจะถูกกำหนด ตามชนิดของพืชที่ปกคลุมพื้นผิว	Allen et al, 1998
7	สัมประสิทธิ์ ของความ ขรุขระ	nManning	สัมประสิทธิ์ของความขรุขระจะ ถูกกำหนดตามชนิดของพื้นผิว ซึ่งค่าที่กำหนดจะอ้างอิงจากค่า สัมประสิทธิ์ของความขรุขระ ของ Manning	ODOT, 2011
8	แฟกเตอร์ พื้นผิว	LandFactor	สัดส่วนการสกัดกั้นน้ำของพื้นผิว (Interception Fraction) ซึ่งจะ ถูกกำหนดตามชนิดของพื้นผิว	กำหนดตามชนิด ของพื้นผิว
9	ความ ต้านทาน อากาศ พลศาสตร์	AerodynResistance	ความต้านทานอากาศพลศาสตร์ สำหรับแบบจำลองนี้จะใช้ค่า ความต้านทานอากาศพลศาสตร์ ต่อ 1 หน่วยความเร็วลม (เมตร ต่อวินาที) โดยคำนวณจาก สมการจากแบบจำลอง ซึ่งค่า ความต้านทานอากาศพลศาสตร์ จะขึ้นกับค่าของความสูงของพืช	คำนวณโดยใช้ สมการจาก แบบจำลอง

การใช้ที่ดินแต่ละชนิดจะถูกจำแนกด้วยตัวเลขรหัสของการใช้ที่ดิน (Code) เพื่อให้แบบจำลองสามารถจำแนกชนิดของการใช้ที่ดินในแต่ละพื้นที่ และเข้าถึงพารามิเตอร์ของแต่ละพื้นที่ได้อย่างถูกต้อง โดยการใช้ที่ดินนั้นถูกกำหนดโดยรหัส ซึ่งสอดคล้องกับการใช้ที่ดินดังภาพที่ 2-35 และตารางที่ 2-28 ซึ่งในการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยแบบจำลอง WETSPASS ข้อมูลพารามิเตอร์ของแต่ละการใช้ที่ดินจะถูกเรียกจากตารางข้อมูลพารามิเตอร์ (ตารางที่ 2-24) ที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง



ภาพที่ 2-35 การใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 2-28 พารามิเตอร์การใช้ที่ดินสำหรับการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS

ลำดับที่	การใช้ที่ดิน	ชนิดของพื้นผิว	สัดส่วนพื้นผิวปกคลุมดิน				ความลึก ของราก พืช (ม.)	ค่าดัชนี พื้นที่ใบ	ความต้านทาน ของปากใบ ต่ำสุด (วินาที/เมตร)	ความสูงของพืช (ม.)	สัมประสิทธิ์ของ ความขรุขระ	แฟกเตอร์พื้นผิว	ความต้านทานอากาศ พลศาสตร์
Code	LUSE_TYPE	RUNOFF_ VEG	VEG_ AREA	BARE_ AREA	IMP_ AREA	OPENW_ AREA	ROOT_ DEPTH	LAI	MIN_STOM	VEG_HEIGHT	nManning	LandFactor	AerodynResistance
1	Aquacultural Land	Open Water	0.00	0.00	0.00	1.00	0.05	0.00	110.00	0.00	0.025	1.000	0.000
2	Aquatic Plant	Open Water	0.00	0.00	0.00	1.00	0.05	0.00	110.00	0.00	0.035	1.000	0.000
3	Artificial Water Body	Open Water	0.00	0.00	0.00	1.00	0.05	0.00	110.00	0.00	0.025	1.000	0.000
4	City, Town, Commercial	Concrete	0.00	0.00	1.00	0.00	0.05	0.00	100.00	0.00	0.012	0.100	0.000
5	Communicat ion and Utility	Concrete	0.00	0.00	1.00	0.00	0.05	0.00	100.00	0.00	0.012	0.100	0.000
6	Deciduous Forest	Forest	1.00	0.00	0.00	0.00	3.32	5.00	250.00	18.00	0.150	0.200	27.196
7	Field Crop	Crop	1.00	0.00	0.00	0.00	1.20	4.00	180.00	3.00	0.040	0.500	54.699
8	Field Crop/ Horticulture	Crop	0.90	0.10	0.00	0.00	0.80	4.00	180.00	1.90	0.040	0.500	67.969
9	Garbage Dump	Bare Soil	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	110.00	0.00	0.025	0.250	0.000
10	Golf Course	Grass	1.00	0.00	0.00	0.00	0.70	2.00	100.00	0.10	0.030	0.500	225.158
11	Horticulture	Crop	0.80	0.20	0.00	0.00	0.40	4.00	180.00	0.80	0.040	0.500	101.452

ตารางที่ 2-28 (ต่อ)

ลำดับที่	การใช้ที่ดิน	ชนิดของพื้นผิว	สัดส่วนพื้นผิวปกคลุมดิน				ความลึก ของราก พืช (ม.)	ค่าดัชนี พื้นที่ใบ	ความต้านทาน ของปากใบ ต่ำสุด (วินาที/เมตร)	ความสูงของพืช (ม.)	สัมประสิทธิ์ของ ความขรุขระ	แฟกเตอร์พื้นผิว	ความต้านทานอากาศ พลศาสตร์
Code	LUSE_TYPE	RUNOFF_ VEG	VEG_ AREA	BARE_ AREA	IMP_ AREA	OPENW_ AREA	ROOT_ DEPTH	LAI	MIN_STOM	VEG_HEIGHT	nManning	LandFactor	AerodynResistance
12	Industrial Land	Concrete	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.012	0.100	0.000
13	Institutional Land	Concrete	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.012	0.100	0.000
14	Marsh and Swamp	Marsh	0.00	0.00	0.00	1.00	0.05	0.00	110.00	0.00	0.025	1.000	0.000
15	Mine, Pit	Bare Soil	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	110.00	0.00	0.025	0.250	0.000
16	Natural Water Body	Open Water	0.00	0.00	0.00	1.00	0.05	0.00	110.00	0.00	0.025	1.000	0.000
17	Orchard	Crop	0.90	0.10	0.00	0.00	1.40	4.00	180.00	3.00	0.040	0.500	54.699
18	Other Built- Up Land	Concrete	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.012	0.100	0.000
19	Other Miscellaneous Land	Grass	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	2.00	100.00	0.20	0.035	0.500	177.468
20	Paddy Field	Crop	1.00	0.00	0.00	0.00	0.50	4.00	180.00	1.00	0.040	0.500	91.761
21	Pasture and Farm House	Grass	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	2.00	100.00	0.20	0.030	0.500	177.468

ตารางที่ 2-28 (ต่อ)

ลำดับที่	การใช้ที่ดิน	ชนิดของพื้นผิว	สัดส่วนพื้นผิวปกคลุมดิน				ความลึก ของราก พืช (ม.)	ค่าดัชนี พื้นที่ใบ	ความต้านทาน ของปากใบ ต่ำสุด (วินาที/เมตร)	ความสูงของพืช (ม.)	สัมประสิทธิ์ของ ความขรุขระ	แฟกเตอร์พื้นผิว	ความต้านทานอากาศ พลศาสตร์
Code	LUSE_TYPE	RUNOFF_ VEG	VEG_ AREA	BARE_ AREA	IMP_ AREA	OPENW_ AREA	ROOT_ DEPTH	LAI	MIN_STOM	VEG_HEIGHT	nManning	LandFactor	AerodynResistance
22	Pasture and Farm House/Aqua Cultural Land	Grass/Open Water	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	2.00	100.00	0.20	0.030	1.000	177.468
23	Perennial Crop	Forest	0.80	0.20	0.00	0.00	3.32	5.00	250.00	10.00	0.040	0.400	32.701
24	Perennial Crop/Orchard	Crop	0.90	0.10	0.00	0.00	2.40	4.00	180.00	3.00	0.040	0.500	54.699
25	Rangeland	Grass	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	2.00	100.00	0.20	0.030	0.500	177.468
26	Village	Concrete	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.012	0.100	0.000

2.5.1.4 ข้อมูลชนิดของดิน

ข้อมูลชนิดของดินจากการสำรวจในปี พ.ศ. 2554 ถูกรวบรวมจากกรมพัฒนาที่ดิน (LDD) ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนของดินชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา โดยในพื้นที่ศึกษาประกอบด้วยดินทั้งหมด 11 ชนิด ดังภาพที่ 2-34 และตารางที่ 2-29 ซึ่งดินแต่ละชนิดนั้นจะประกอบไปด้วย 9 พารามิเตอร์ ได้แก่ (1) ความจุสนาม (Field Capacity) (2) จุดเหี่ยวเฉาถาวร (Permanent Wilting Point) (3) น้ำที่พืชนำไปใช้ได้ (Plant Available Water) (4) ความชื้นคงค้าง (Residual Water Content) (5) พารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของดิน (Soil Empirical Parameter) (6) ความลึกระเหย (Evaporation Depth) (7) ความลึกแรงดึงผิวที่จุดอิ่มตัว (Tension Saturated Height) (8) สัดส่วนวันที่ฝนตกในแต่ละเดือน (Precipitation Fraction) และ (9) ความชื้นในดิน (Water Content) โดยมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2-29 รายละเอียดพารามิเตอร์ดิน

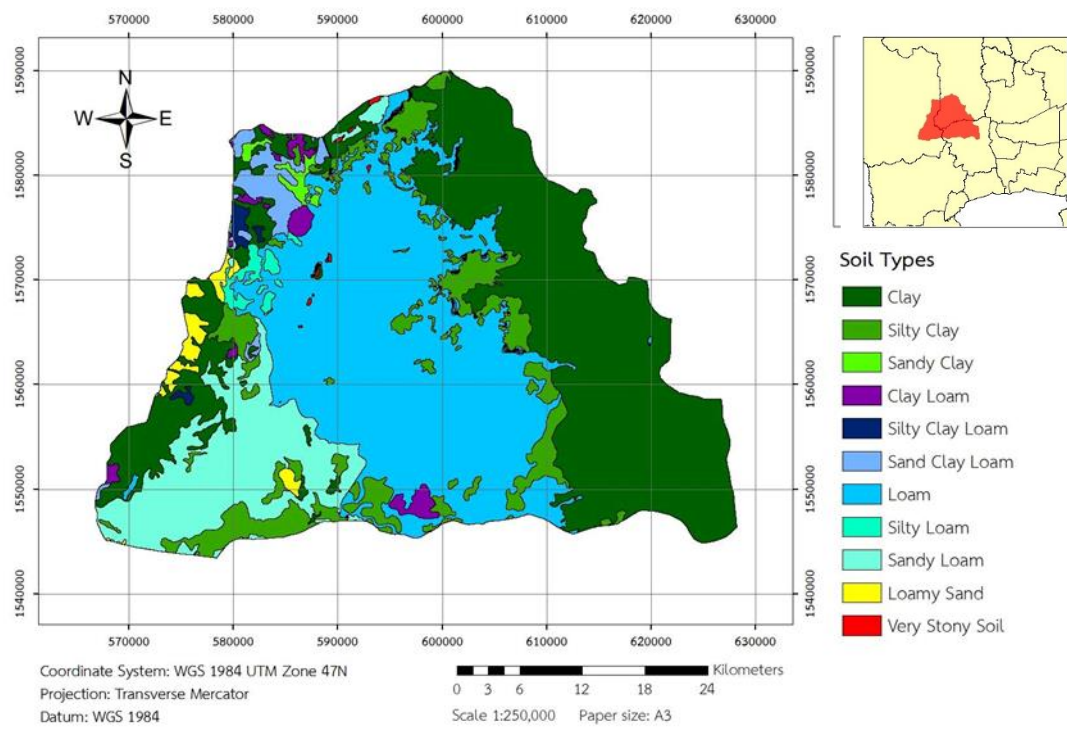
ลำดับ ที่	พารามิเตอร์	สัญลักษณ์ สำหรับ แบบจำลอง	รายละเอียด	แหล่งข้อมูล
1	ความจุสนาม	FIELD CAPAC	ความจุสนามหรือความจุความชื้นสนาม คือ ความชื้นของดินที่ยังคงเหลืออยู่ เมื่อ ดินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว 2-3 วัน หลังจากที่ไม่มีการไหลของน้ำด้วยอิทธิพลแรงโน้มถ่วง	เนื่องจากข้อมูลพารามิเตอร์ของดินมีความอ่อนไหวเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม
2	จุดเหี่ยวเฉาถาวร	WILTING PNT	จุดเหี่ยวเฉาถาวร คือ ความชื้นของดิน ที่ทำให้พืชเหี่ยวเฉาเนื่องจากขาดน้ำ เพราะไม่สามารถดูดน้ำมาทดแทนการคายน้ำได้	ซึ่งทำให้ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ถึงแม้จะถูกจัดให้เป็นดินชนิดเดียวกัน
3	น้ำที่พืชนำไปใช้ได้	PAW	น้ำที่พืชนำไปใช้ได้ คือ ความชื้นในดินที่รากพืชสามารถดูดไปใช้ได้ ซึ่งหาได้จากความจุความชื้นสนามหักลบด้วยความชื้นจุดเหี่ยวเฉาถาวร	ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นจากแบบจำลองมาใช้
4	ความชื้นคงค้าง	RESIDUAL WC	ความชื้นคงค้าง คือ ความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในดิน หลังจากที่ยากพืชใช้น้ำไปใช้แล้ว	
5	พารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของดิน	A1	พารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของดิน คือ พารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของดิน ซึ่งแสดงถึงลักษณะของดิน โดยค่าของพารามิเตอร์นี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอนุภาคทรายในดิน	

ลำดับ ที่	พารามิเตอร์	สัญลักษณ์ สำหรับ แบบจำลอง	รายละเอียด	แหล่งข้อมูล
6	ความลึก ระเหย	EVAPODEPTH	ความลึกระเหย คือ ความลึกสูงสุดที่ ความชื้นในดินจะระเหยออกไป เนื่องจาก ปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ	เป็นพารามิเตอร์ ของพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 2-29 (ต่อ)

ลำดับ ที่	พารามิเตอร์	สัญลักษณ์ สำหรับ แบบจำลอง	รายละเอียด	แหล่งข้อมูล
7	ความลึก แรงตึงผิวที่ จุดอิ่มตัว	TENSIONHHT	ความลึกแรงตึงผิวที่จุดอิ่มตัว คือ แรงตึง ของน้ำในดินที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของ ความชื้นในดิน โดยแสดงค่าออกมาในรูป ของความสูง	
8	สัดส่วนวันที่ ฝนตกในแต่ละ เดือน	P_FRAC_SUM และ P_FRAC_WIN	สัดส่วนของวันที่มีฝนตกต่อวันทั้งหมดใน แต่ละเดือน โดยแยกตามพื้นที่ของดินแต่ละ ชนิด ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน สำหรับ ช่วงฤดูร้อน และฤดูหนาว	
9	ความชื้นใน ดิน	Teta	ความชื้นในดิน คือ ปริมาณความชื้นในที่ สถานะเริ่มต้นก่อนเริ่มการจำลองการเติมน้ำ ใต้ดิน	

เช่นเดียวกับข้อมูลการใช้ที่ดิน ข้อมูลชนิดของดินแต่ละชนิดจะถูกจำแนกด้วยตัวเลขรหัสของชนิดดิน (Code) เพื่อให้แบบจำลองสามารถจำแนกชนิดของดินในแต่ละพื้นที่ และเข้าถึงพารามิเตอร์ของแต่ละพื้นที่ได้อย่างถูกต้อง โดยชนิดดินจะถูกกำหนดโดยรหัส ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะดินในพื้นที่ดังกล่าวที่ 2-36 และตารางที่ 2-30 ซึ่งในการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยแบบจำลอง WETSPASS ข้อมูลพารามิเตอร์ของดินแต่ละชนิดจะถูกเรียกจากตารางข้อมูลพารามิเตอร์ (ตารางที่ 2-32) ที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง



ภาพที่ 2-36 ชนิดของดินในพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 2-30 พารามิเตอร์ชนิดดินสำหรับการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS

Code	Soil Texture	Water Content at Field Capacity (Frac v/v)	Permanent Wilting Point (Frac v/v)	Plant Available Water (FC-WP)	Residual Water Content (Frac v/v)	Soil Empirical Parameter for ET	Evaporation Depth (m)	Tension Saturated Height (m)	Precipitation Fraction		Water Content (Frac w/w)
									Summer	Winter	
Code	SOIL	FIELD CAPAC	WILTING PNT	PAW	RESIDUAL WC	A1	EVAP DEPTH	TENSION HHT	P_FRAC_SUM	P_FRAC_WIN	Teta
1	Clay	0.46	0.33	0.13	0.090	0.14	0.05	0.41	0.95	0.85	0.852
2	Silty Clay	0.43	0.27	0.16	0.056	0.23	0.05	0.49	0.84	0.75	0.754
3	Sandy Clay	0.32	0.23	0.09	0.109	0.25	0.05	0.15	0.80	0.68	0.471
4	Clay Loam	0.33	0.19	0.14	0.075	0.075	0.05	0.63	0.62	0.41	0.493
5	Silty Clay Loam	0.36	0.19	0.17	0.040	0.04	0.05	0.36	0.62	0.41	0.563
6	Silty Loam	0.29	0.10	0.19	0.015	0.068	0.05	0.79	0.26	0.07	0.408
7	Sandy Clay Loam	0.26	0.16	0.10	0.068	0.04	0.05	0.30	0.54	0.30	0.351
8	Loam	0.25	0.12	0.13	0.027	0.41	0.05	0.48	0.15	0.02	0.333
9	Sandy Loam	0.21	0.09	0.12	0.041	0.18	0.05	0.22	0.09	0.01	0.266
10	Loamy Sand	0.15	0.07	0.08	0.035	0.035	0.05	0.09	0.09	0.01	0.176
11	Very Stony Soil	0.10	0.05	0.05	0.025	0.01	0.05	0.06	0.09	0.01	0.150

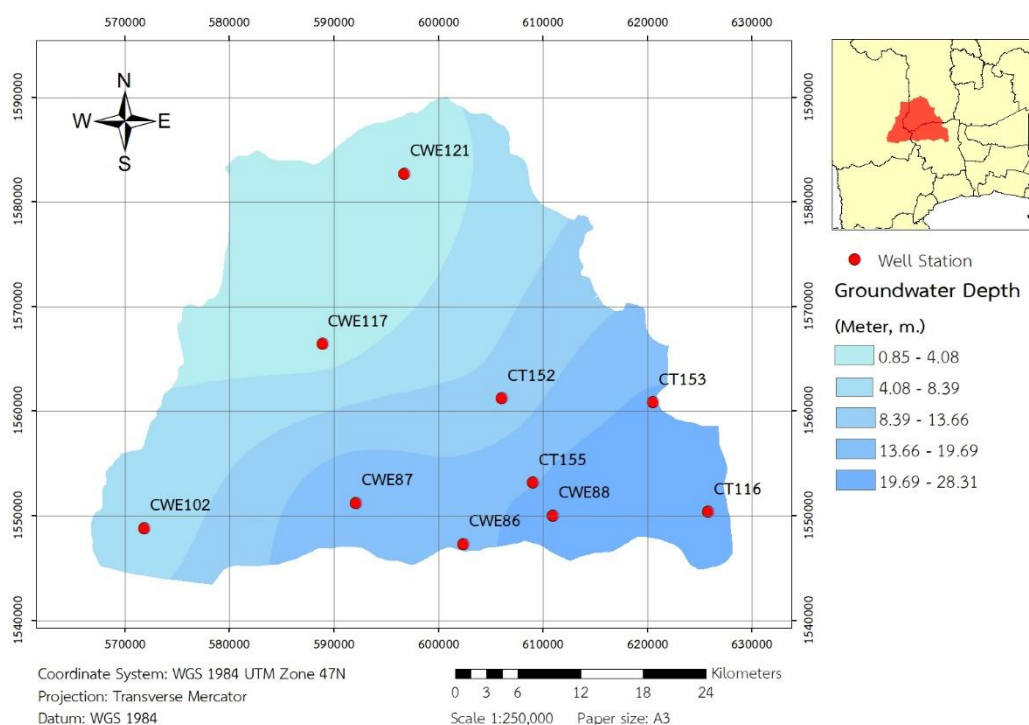
2.5.1.5 ข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน

ข้อมูลระดับน้ำใต้ดินรายเดือนถูกรวบรวมจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (DGR) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลระดับน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ (Observation Well) ในพื้นที่ศึกษารวมทั้งสิ้น 10 บ่อ ดังภาพที่ 2-37 โดยมีรายละเอียดบ่อดังที่แสดงในตารางที่ 2-31 โดยข้อมูลระดับน้ำใต้ดินที่ขาดหายไปนั้นจะถูกต่อเติมโดยการวิเคราะห์แนวโน้มของระดับน้ำใต้ดิน โดยกำหนดให้บ่อในพื้นที่ศึกษามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับน้ำใต้ดินในรูปแบบเดียวกัน ซึ่งแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินศึกษาจากข้อมูลระดับน้ำใต้ดินในปี พ.ศ. 2553 เนื่องจากเป็นปีที่มีข้อมูลระดับน้ำใต้ดินที่ค่อนข้างจะครบถ้วนมากที่สุด โดยข้อมูลระดับน้ำใต้ดินที่ทราบค่าจะถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้น จากนั้นในเดือนถัดไปจะเพิ่มลดตามค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินที่ได้จากการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินจากปี พ.ศ. 2553 และทำต่อเนื่องไปจนครบทุกเดือนในทุกปี

ตารางที่ 2-31 รายละเอียดบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษา

ลำดับ ที่	จังหวัด	ที่ตั้ง	สถานี	ค่าพิกัดบ่อ	
				X	Y
1	นครปฐม	วัดทะเลบก	CT152	606031	1561216
2	นครปฐม	อบต.ดอนข่อย	CWE88	610945	1550038
3	นครปฐม	วัดดอนเตาอิฐ	CT155	609053	1553160
4	นครปฐม	วัดสี่แยกเจริญพร	CWE87	592075	1551232
5	นครปฐม	วัดกำแพงแสน	CWE86	602381	1547294
6	นครปฐม	ที่ว่าการอำเภอบางเลน	CT116	625804	1550379
7	นครปฐม	วัดบางหลวง	CT153	620508	1560845
8	สุพรรณบุรี	วัดหนองกระดี่	CWE117	588896	1566424
9	สุพรรณบุรี	วัดใหม่สีทาวาส	CWE121	596723	1582692
10	กาญจนบุรี	วัดกว้างทองราษฎร์บูรณะ	CWE102	571874	1548812

ข้อมูลระดับน้ำใต้ดินรายเดือนจากทั้ง 10 บ่อ จะถูกใช้เพื่อหาการกระจายตัวของระดับน้ำใต้ในพื้นที่ โดยใช้การประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Spatial Interpolation) เช่นเดียวกับข้อมูลความเร็วลม เพียงแต่จะใช้วิธีการประมาณค่าเชิงพื้นที่โดยวิธีคริกิง (Kriging Method) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ IDW เพียงแต่มีความซับซ้อนมากกว่าทำให้สามารถประมาณค่าที่สูงหรือต่ำกว่าค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าเริ่มต้นได้



ภาพที่ 2-37 การกระจายตัวของระดับน้ำใต้ดินเดือนกันยายนปี พ.ศ. 2553 ในพื้นที่ศึกษาโดยวิธีครีกริง

2.5.2 ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS

การจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS ในการศึกษานี้จะดำเนินการจำลองการเติมน้ำใต้ดินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560 โดยแบ่งเป็นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2553 สำหรับการปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554-2560 สำหรับการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Validation)

2.5.2.1 ข้อมูลนำเข้า

ข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS ประกอบด้วยข้อมูลหลัก 5 ประเภท และข้อมูลย่อยในกลุ่มของข้อมูลหลักต่าง ๆ รวมทั้งสิ้น 11 ข้อมูล ดังตารางที่ 2-23 โดยข้อมูลนำเข้าทั้งหมดนั้นจะต้องถูกจัดให้อยู่ในรูปของการกระจายตัวเชิงพื้นที่ (ESRI Grid Format, ASC หรือ ASCII) ยกเว้นข้อมูลพารามิเตอร์ของการใช้ที่ดิน และข้อมูลพารามิเตอร์ของดินที่จะถูกนำเข้าในรูปแบบตารางข้อมูล โดยข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ข้อมูลการใช้ที่ดิน และข้อมูลชนิดของดินนั้นเป็นข้อมูลที่ถูกรวบรวมจากการเก็บรวบรวมข้อมูลในปี พ.ศ. 2554 จะถูกใช้เป็นตัวแทนของลักษณะทางภูมิศาสตร์ ลักษณะการใช้ที่ดิน และชนิดของดินในพื้นที่ศึกษาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560 โดยที่ข้อมูลการใช้ที่ดิน และข้อมูลชนิดของดินจะต้องมีพารามิเตอร์การใช้ที่ดิน และพารามิเตอร์ชนิดดิน ซึ่งอยู่ในรูปแบบตารางข้อมูลตามตารางที่ 2-27 และตารางที่ 2-28 ตามลำดับ ส่วนของข้อมูลทางอุทกนิยมนิเวศวิทยา และข้อมูลระดับน้ำใต้ดินจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของการกระจายตัวเชิงพื้นที่รายเดือน

2.5.2.2 การดำเนินการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยแบบจำลอง WETSPASS

การจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS ทำโดยแยกการจำลองออกเป็นรอบปี ซึ่งแต่ละปีจะทำการจำลองแยกออกเป็นรายเดือนแบบไม่ต่อเนื่องกันภายในการจำลองของรอบปีเดียวกัน ซึ่งภายในแบบจำลองจะประกอบด้วยแฟ้มข้อมูลหลัก 2 ไฟล์ ได้แก่ Inputs และ Outputs โดยที่ข้อมูลนำเข้าจะต้องอยู่ในรูปแบบที่ถูกต้อง จำเป็นต้องตั้งชื่อข้อมูล และจัดวางตำแหน่งของข้อมูลให้ตรงตามที่แบบจำลองได้กำหนดไว้ภายในแฟ้มข้อมูล Inputs ของแบบจำลองที่ประกอบด้วยแฟ้มข้อมูลหลัก 2 ส่วน คือ Tables และ Maps โดยภายในแฟ้มข้อมูล Tables จะใช้ในการเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ และภายในแฟ้มข้อมูล Maps นั้นจะประกอบด้วยแฟ้มข้อมูลย่อยต่าง ๆ สำหรับเก็บข้อมูลนำเข้ารายเดือน ได้แก่ Rain, Temp, Pet, Wind และ Gwdepth สำหรับเก็บข้อมูลนำเข้าตารางที่ 2-28 โดยข้อมูลรายเดือนเหล่านี้จะต้องถูกตั้งชื่อตามชนิดของข้อมูลอย่างถูกต้อง และต่อท้ายด้วยตัวเลขตั้งแต่ 1 ถึง 12 ซึ่งแทนใช้แทนลำดับเดือนตั้งแต่มกราคมจนถึงธันวาคมตามลำดับ ในส่วนของพารามิเตอร์จะต้องอยู่ในรูปของ Text ไฟล์ และวางไว้ในแฟ้มข้อมูล Tables เพื่อให้แบบจำลองสามารถเข้าถึงพารามิเตอร์ได้ตามประเภทของการใช้ดิน และชนิดของดินนั้น เมื่อทำการจำลองการเติมน้ำใต้ดิน

ตารางที่ 2-32 ข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS สำหรับการจำลองแต่ละปี

ข้อมูลนำเข้า	ชื่อข้อมูล	ตำแหน่งข้อมูล
แบบจำลองความสูงเชิงเลข	elevation (.asc)	Inputs > maps
ความลาดชัน	slope (.asc)	
การใช้ที่ดินในพื้นที่	landuse (.asc)	
ชนิดของดินในพื้นที่	soil (.asc)	
ข้อมูลฝน	rain1-12 (.asc)	Inputs > maps > rain
ข้อมูลอุณหภูมิ	temp1-12 (.asc)	Inputs > maps > temp
ข้อมูลการระเหยคายน้ำเบื้องต้น	pet1-12 (.asc)	Inputs > maps > pet
ข้อมูลความเร็วลม	wind1-12 (.asc)	Inputs > maps > wind
ข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน	gwdepth1-12 (.asc)	Inputs > maps > gwdepth
พารามิเตอร์ของการใช้ที่ดินแต่ละประเภท	landuse (.txt)	Inputs > tables
พารามิเตอร์ของดินแต่ละชนิด	soil (.txt)	

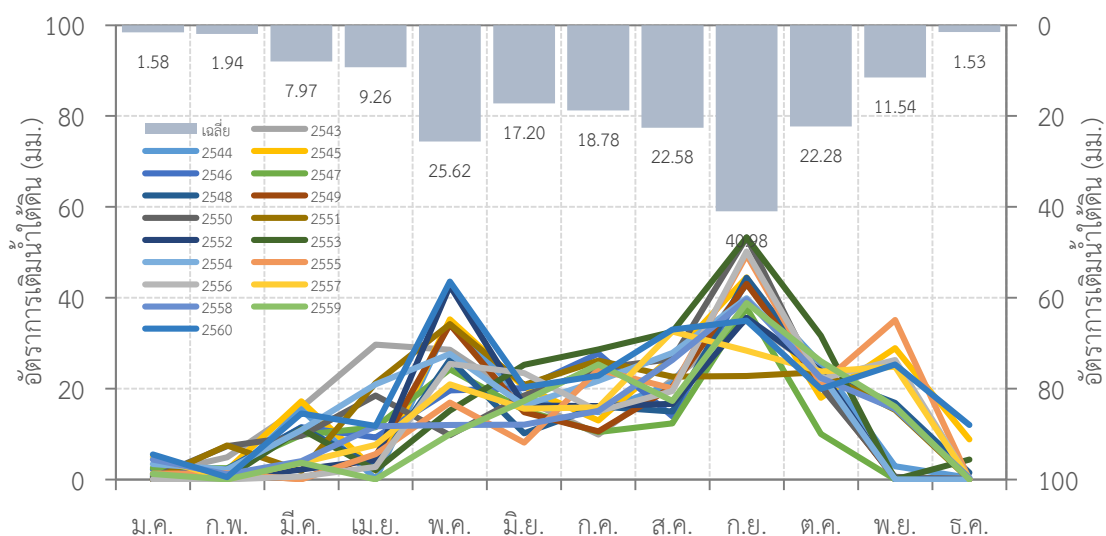
2.5.2.3 อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากการจำลอง WETSPASS

ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560 แสดงผลในตารางที่ 2-33 และภาพที่ 2-38 ซึ่งพบว่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินผันแปรค่าระหว่างปี กล่าวคือ อัตราการเติมน้ำใต้ดินเฉลี่ยตลอดช่วงฤดูแล้งระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายนมีค่าเท่ากับ 33.9 มิลลิเมตร หรือคิดเป็น 18.15% ของอัตราการเติมน้ำใต้ดินต่อปี ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินเฉลี่ยตลอดช่วงฤดูฝนระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมที่มีค่าเท่ากับ 147.4 มิลลิเมตร

หรือคิดเป็น 81.85% ของอัตราการเติมน้ำใต้ดินต่อปี ทั้งนี้เนื่องมาจากปัจจัยฝนที่มีการเติมน้ำไปในชั้นน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ยังพบว่า ในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบางเลนซึ่งมีลักษณะดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวมีสัดส่วนอัตราการเติมน้ำใต้ดินน้อยกว่าพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้องและพนมทวนที่มีลักษณะดินส่วนใหญ่เป็นดินร่วนและดินร่วนปนทราย ตามลำดับ

ตารางที่ 2-33 ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560

ปี	อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (มม.ต่อเดือน)												
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ต่อปี
2543	1.2	4.9	15.8	29.7	28.6	17.7	9.9	22.0	35.2	24.0	0.0	0.0	188.8
2544	0.6	0.0	15.4	0.1	34.8	17.7	14.8	21.1	43.0	25.4	2.9	0.3	176.2
2545	0.0	2.1	17.2	2.0	35.3	20.3	13.0	27.1	44.5	18.0	28.9	8.8	217.1
2546	2.2	2.3	11.5	9.2	19.6	20.1	27.7	13.9	43.7	21.8	0.0	0.0	171.9
2547	2.5	2.5	9.8	11.5	24.2	15.2	10.5	12.4	37.8	10.0	0.0	0.0	136.4
2548	0.8	2.3	11.4	2.7	26.4	10.2	16.1	15.0	44.4	23.0	16.8	1.5	170.6
2549	0.0	0.6	0.2	5.1	34.1	14.8	10.6	20.4	43.1	20.9	0.2	0.1	150.1
2550	0.5	7.3	9.6	18.5	9.7	18.4	24.5	26.5	53.3	20.4	0.5	0.0	189.3
2551	0.0	7.5	1.9	21.2	34.2	20.8	26.1	22.6	22.8	23.6	15.3	0.0	196.0
2552	0.0	0.0	2.2	4.3	42.6	16.3	16.1	16.6	35.6	23.9	0.0	0.0	157.7
2553	0.1	0.4	11.1	2.1	15.2	25.2	28.6	32.5	53.3	31.6	0.0	4.4	204.4
2554	3.4	2.2	10.9	20.9	27.7	16.3	21.7	27.9	39.9	23.1	0.0	0.0	193.9
2555	1.3	1.3	0.0	5.6	16.9	8.1	24.2	20.0	49.4	20.9	35.1	0.0	182.8
2556	0.0	0.0	0.6	2.8	25.4	23.4	15.0	19.4	50.2	22.1	26.3	0.0	185.3
2557	4.9	0.1	3.7	7.6	21.0	15.6	15.8	32.5	28.4	23.7	24.8	0.1	178.3
2558	4.4	1.1	4.0	11.7	12.0	12.1	15.1	26.3	39.6	22.3	15.5	0.3	164.4
2559	1.2	0.0	3.7	0.0	9.9	17.3	25.3	17.2	38.9	26.0	16.0	0.0	155.5
2560	5.5	0.5	14.6	11.8	43.5	20.3	22.9	33.0	34.9	20.0	25.3	12.0	244.2
รายฤดูเฉลี่ย	ฤดูแล้งระหว่าง พ.ย.-เม.ย. 33.9 มม. (18.15%)				ฤดูฝนระหว่าง พ.ค.-ต.ค. 147.4 มม. (85.15%)						ฤดูแล้งระหว่าง พ.ย.-เม.ย. 33.9 มม. (18.15%)		รายปีเฉลี่ย 181.3 มม.



ภาพที่ 2-38 การกระจายตัวของอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายเดือนจากผลการจำลองโดยใช้โดยใช้แบบจำลอง WETSPASS ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560

2.6 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

ผลการพัฒนาแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน (Model of Groundwater Flow, MODFLOW) เพื่อจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินและประเมินสถานภาพของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาซึ่งพิจารณาเฉพาะพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลนมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

2.6.1 ข้อมูลป้อนเข้าแบบจำลอง VISUAL MODFLOW

2.6.1.1 ข้อมูลน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ (Observation Wells Data)

ข้อมูลบ่อสังเกตการณ์ (Observation Wells Data) ที่รวบรวมได้จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลนมีจำนวน 22 บ่อ การนำเข้าข้อมูลน้ำใต้ดินของบ่อสังเกตการณ์ในแบบจำลอง VISUAL MODFLOW ประกอบด้วยความลึกของบ่อ (Depth of Observation Wells) ความลึกของระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ (Water Depth)

2.6.1.2 ข้อมูลน้ำใต้ดินจากบ่อสูบ (Pumping Wells Data)

ข้อมูลบ่อสูบน้ำใต้ดิน (Pumping Wells Data) ที่รวบรวมได้จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาลเฉพาะในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลน มีทั้งสิ้น 546 บ่อ การนำเข้าข้อมูลบ่อสูบน้ำใต้ดินในแบบจำลอง VISUAL MODFLOW ประกอบด้วยความลึกของบ่อ (Depth of Pumping Wells) ความลึกของท่อกรอง (Screen Depth) อัตราการสูบน้ำใต้ดินไปใช้ (Pumping Rate) ซึ่งถูกกำหนดที่อัตราการสูบน้ำที่ปลอดภัย (Safe Yield) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16 และ 24 ชั่วโมงต่อวัน สำหรับบ่อสูบน้ำใต้ดินของรัฐและเอกชน ตามลำดับ

2.6.1.3 ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน (Borehole Data)

ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน (Borehole Data) ที่รวบรวมได้จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาลพบว่า ตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจชั้นดินกระจายทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา และจากข้อมูลหลักฐานธรณีวิทยาที่ได้ การศึกษานี้ได้แบ่งชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน (Aquifer) ออกเป็น 9 ชั้นที่มีลักษณะเป็นชั้นหินอุ้มน้ำที่มีแรงดัน (Confined Aquifer) ประกอบด้วย (1) ชั้นหินอุ้มน้ำกรุงเทพฯ (Bangkok Aquifer, BK) (2) ชั้นหินอุ้มน้ำพระประแดง (Phra Pradaeng Aquifer, PD) (3) ชั้นหินอุ้มน้ำนครหลวง (Nakhon Luang Aquifer, NL) (4) ชั้นหินอุ้มน้ำนนทบุรี (Nonthaburi Aquifer, NB) (5) ชั้นหินอุ้มน้ำสามโคก (Sam Khok Aquifer, SK) (6) ชั้นหินอุ้มน้ำพญาไท (Phaya Thai Aquifer, PT) (7) ชั้นหินอุ้มน้ำธนบุรี (Thonburi Aquifer, TB) (8) ชั้นหินอุ้มน้ำปากน้ำ (Pak Nam Aquifer, PN) และ (9) ชั้นหินแข็งอุ้มน้ำ (Hard Rock Aquifer) โดยแต่ละชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินจะมีดินเหนียวกรุงเทพฯ และชั้นดินกั้นน้ำ (Aquitard) กั้นระหว่างชั้น ลักษณะสำคัญของแต่ละชั้นหินอุ้มน้ำและลำดับการจัดแบ่งชั้นน้ำสรุปไว้ในตารางที่ 2-34

ตารางที่ 2-34 ลักษณะชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินและลำดับการจัดแบ่งชั้นน้ำในพื้นที่ศึกษา

ชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน	ลักษณะสำคัญ	ลักษณะ	ลำดับชั้น
ชั้นหินอุ้มน้ำกรุงเทพฯ (Bangkok Aquifer, BK)	ตั้งอยู่ชั้นบนสุดมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 20-30 เมตร ปกคลุมด้วยชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯซึ่งมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 20 เมตร	ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined Aquifer)	2
ชั้นหินอุ้มน้ำพระประแดง (Phra Pradaeng Aquifer, PD)	ความหนาประมาณ 20-50 เมตร	ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined Aquifer)	4
ชั้นหินอุ้มน้ำนครหลวง (Nakhon Luang Aquifer, NL)	ความหนาประมาณ 50-60 เมตร	ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined Aquifer)	6
ชั้นหินอุ้มน้ำนนทบุรี (Nonthaburi Aquifer, NB)	ความหนาประมาณ 60-70 เมตร	ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined Aquifer)	8
ชั้นหินอุ้มน้ำสามโคก (Sam Khok Aquifer, SK)	ความหนาประมาณ 50-70 เมตร	ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined Aquifer)	10
ชั้นหินอุ้มน้ำพญาไท (Phaya Thai Aquifer, PT)	ความหนาประมาณ 50-70 เมตร	ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined Aquifer)	12
ชั้นหินอุ้มน้ำธนบุรี (Thonburi Aquifer, TB)	ความหนาประมาณ 30-50 เมตร	ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined Aquifer)	14
ชั้นหินอุ้มน้ำปากน้ำ (Pak Nam Aquifer, PN)	ความหนาประมาณ 60-90 เมตร	ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined Aquifer)	16
ชั้นหินแข็งอุ้มน้ำ (Hard Rock Aquifer)	ประกอบด้วยหินตะกอน หินแปร หินแกรนิต และหินบะซอลต์ ซึ่งมีชั้นดินเหนียวแทรก	ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined Aquifer)	18

ตารางที่ 2-34 (ต่อ)

ชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน	ลักษณะสำคัญ	ลักษณะ	ลำดับ ชั้น
ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok Clay)	–	ชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (Unconfined Aquifer)	1
ชั้นดินกั้นน้ำ (Aquitard)	ชั้นหินดานน้ำ	–	3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17

2.6.1.4 ข้อมูลแม่น้ำ (River Data)

ข้อมูลระดับน้ำ (River Stage) และหน้าตัดขวางของแม่น้ำสายหลัก (River Cross Section) ที่ไหลผ่านพื้นที่ศึกษาถูกนำเข้าในแบบจำลอง VISUAL MODFLOW ได้แก่ แม่น้ำท่าจีนที่ไหลจากทิศเหนือบริเวณจังหวัดชัยนาทออกสู่ทะเลทางทิศใต้ โดยนำเข้าข้อมูลระดับน้ำและหน้าตัดขวางของแม่น้ำแม่กลองจำนวน 2 สถานี ประกอบด้วย สถานีตรวจวัดน้ำท่า T.9 และ T.13

2.6.1.5 ข้อมูลการเติมน้ำใต้ดิน (Recharge Data)

ในการพัฒนาแบบจำลอง VISUAL MODFLOW เริ่มต้นจากการนำเข้าข้อมูลการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge) และข้อมูลการคายระเหยน้ำของพืช (Evapotranspiration) ซึ่งได้จากผลการวิจัยเรื่อง “โครงการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาลโดยอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาณการสูบน้ำที่เหมาะสมของชั้นน้ำบาดาลตะกอนหินร่วน (Safe Yield) เป็นรายจังหวัดพื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีนและแม่กลอง” (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551) โดยค่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินผันแปรตามประเภทของการใช้ที่ดิน (Land Use Type) ดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 2-35 โดยแบ่งการใช้ที่ดินออกเป็นนาข้าว (Paddy Field) ไร่อ้อย (Sugarcane) ป่าไม้ (Forest) และอื่น ๆ (Other) ซึ่งรูปแบบการใช้ที่ดินดังกล่าวนี้มีความแตกต่างจากผลการพัฒนาแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง SWAP และ WETSPASS อย่างไรก็ดี การศึกษานี้ได้นำเข้าอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS เพื่อจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินในแบบจำลอง VISUAL MODFLOW ร่วมด้วย

ตารางที่ 2-35 ข้อมูลการเติมน้ำเฉลี่ยรายปีและอัตราการคายระเหยน้ำของพืชแยกตามประเภทของการใช้ที่ดิน

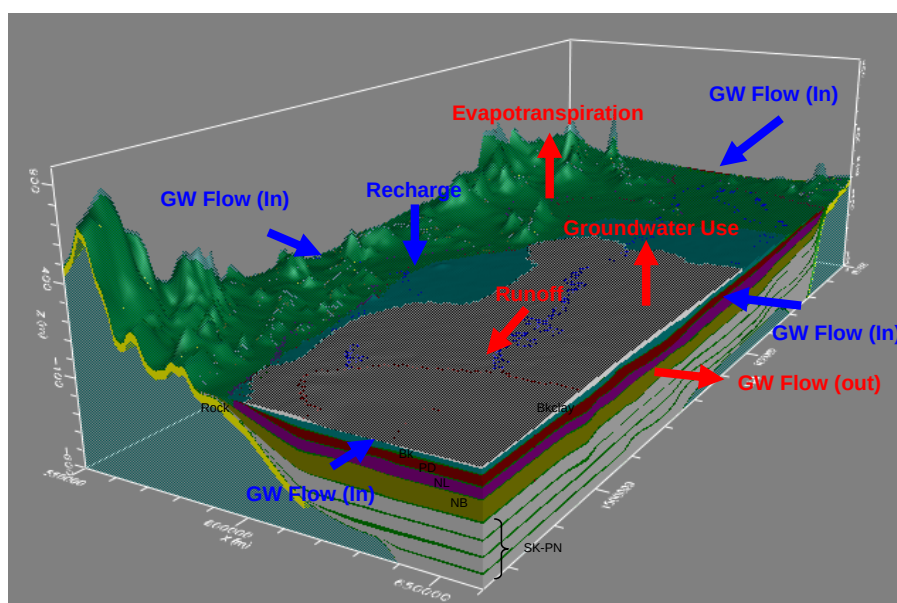
ประเภทของการใช้ที่ดิน	อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (มิลลิเมตรต่อปี)	อัตราการคายระเหยน้ำของพืช (มิลลิเมตรต่อปี)
นาข้าว (Paddy Field)	29.0	833.3
ไร่อ้อย (Sugarcane)	103.9	758.4
ป่าไม้ (Forest)	83.2	779.1
อื่น ๆ (Other)	62.5	799.8

ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2551)

2.6.2 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลอง VISUAL MODFLOW

2.6.2.1 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model)

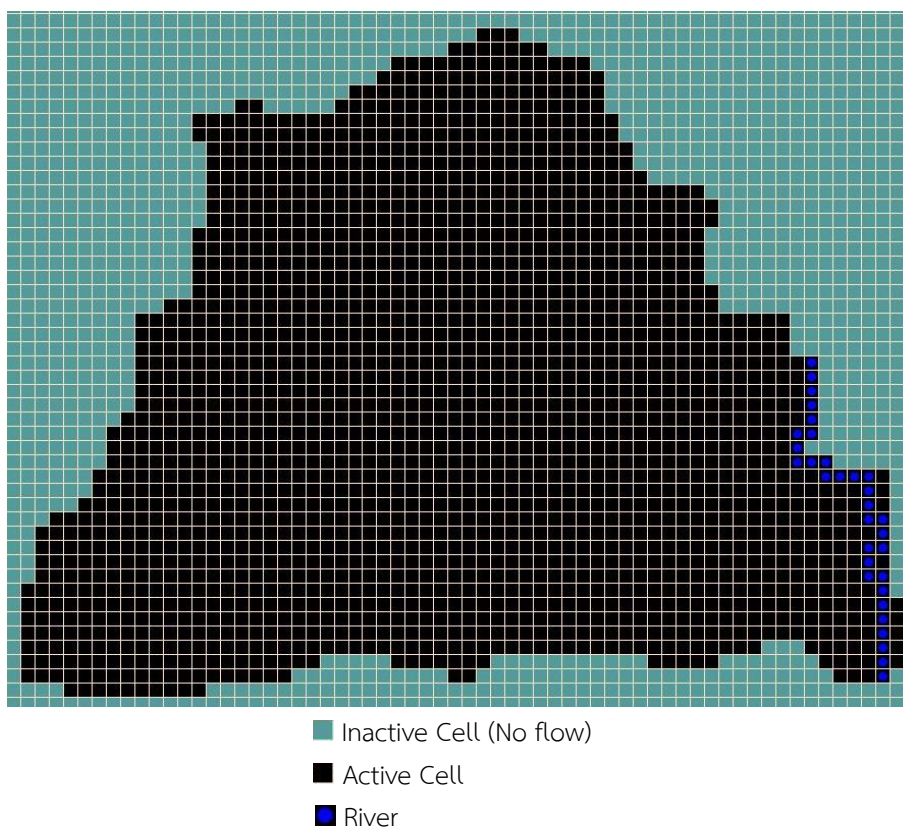
แหล่งน้ำใต้ดิน (Groundwater Source) ในบริเวณพื้นที่ศึกษาเป็นแหล่งน้ำใต้ดินแบบเปิด (Open Source) ซึ่งไหลจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออก จากนั้นจึงไหลออกจากเขตพื้นที่ศึกษาในทางทิศใต้ โดยเลือกศึกษาเฉพาะพื้นที่ที่มีความสามารถในการเติมน้ำใต้ดิน ยกเว้นบริเวณดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งน้ำฝนไม่สามารถเติมน้ำใต้ดินได้ โดยน้ำใต้ดินในบริเวณพื้นที่เกิดการสูญเสียอันเนื่องมาจากการสูบน้ำใต้ดินมาใช้และการไหลออกของน้ำใต้ดินในพื้นที่ดังแสดงในภาพที่ 2-39 จากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน (Borehole Data) สามารถจัดแบ่งชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) ในพื้นที่ศึกษาได้จำนวน 9 ชั้น ซึ่งมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity) และมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของแต่ละชั้นใน 3 ทิศทางคือ x, y และ z ที่แตกต่างกัน (Anisotropy)



ภาพที่ 2-39 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์เพื่อจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

2.6.2.2 การออกแบบกริดในแบบจำลอง (Model Grid Design)

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ระหว่างพิกัดทางตะวันออก UTM 565,710 ถึง 629,178 และระหว่างพิกัดทางเหนือ UTM 1,542,328 ถึง 1,590,959 เมตร แบ่งพื้นที่โดยใช้ระยะกริดขนาด 1.0×1.0 กิโลเมตร ชั้นหินอุ้มน้ำในพื้นที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 9 ชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน ชั้นดินเหนียวกั้นน้ำ 8 ชั้นดิน โดยแทรกในระหว่างชั้นหินอุ้มน้ำในแต่ละชั้น ชั้นผิวดินบนสุดเป็นชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ 1 ชั้น รวมชั้นดินทั้งหมด 18 ชั้นดิน โดยออกแบบกริดที่อยู่ในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลนเป็น Active Cells ส่วนกริดที่อยู่นอกพื้นที่ศึกษากำหนดให้เป็น Inactive Cells ซึ่งจะไม่ถูกนำมาคำนวณ (No Flow) สำหรับรายละเอียดของการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองแสดงในภาพที่ 2-40 และตารางที่ 2-36



ภาพที่ 2-40 การออกแบบกริดและขอบเขตของแบบจำลองในพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 2-36 สรุปรายละเอียดของการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน

ประเภทข้อมูล	ข้อมูล	รายละเอียด
บ่อสูบน้ำใต้ดิน (Pumping Well)	อัตราการสูบน้ำบาดาล (Pumping Rate)	บ่อสูบน้ำในพื้นที่ศึกษาจำนวน 546 บ่อ
	ตารางเวลาการสูบน้ำ (Pumping Schedule)	กำหนดให้บ่อสูบน้ำทำงานตลอดทุกวัน

ตารางที่ 2-36 (ต่อ)

ประเภทข้อมูล	ข้อมูล	รายละเอียด
แม่น้ำ (River)	ระดับน้ำ (Water Stage)	ใช้ค่าจากสถานีวัดน้ำท่า T.9 และ T.13 ของแม่น้ำท่าจีน
	ระดับท้องน้ำ (River Bottom)	
	ค่าความหนาของตะกอนท้องน้ำ (Riverbed Thickness)	
	ค่าความกว้างของลำน้ำ (River Width)	
	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตะกอนท้องน้ำในแนวดิ่ง (Riverbed Conductivity)	
ข้อมูลการเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge)	ค่าการเติมน้ำใต้ดิน	กำหนดให้อัตราการเติมน้ำใต้ดินขึ้นอยู่กับประเภทการใช้ที่ดิน และ Ponding Depth เท่ากับ 0 เมตร
การคายระเหยน้ำของพืช (Evapotranspiration)	ค่าการระเหยของน้ำในพื้นที่และการคายน้ำของพืช	กำหนดให้ปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชขึ้นอยู่กับประเภทการใช้ที่ดินและ Extinction Depth เท่ากับ 2 เมตร
ขอบเขตที่มีน้ำไหลผ่าน (General Head Boundary)	ค่าระดับน้ำจากภายนอกที่บริเวณขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary Head)	อาศัยค่าระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์บริเวณใกล้เคียง

2.6.3 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน

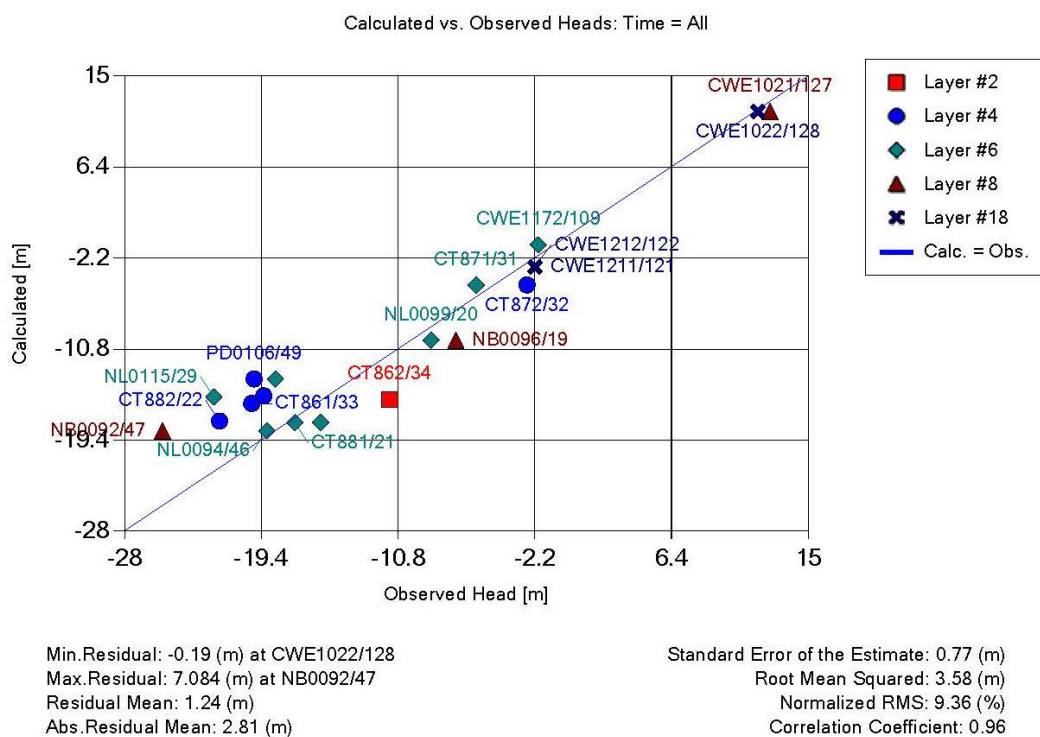
งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินในแบบจำลองโดยอาศัยข้อมูลระดับน้ำรายเดือนจากบ่อสังเกตการณ์จำนวน 20 บ่อ ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2542-2559 และกำหนดอัตราการสูบน้ำใต้ดินไปใช้ (Pumping Rate) โดยอาศัยข้อมูลปัจจุบันที่รวบรวมได้จากสำนักทรัพยากรน้ำบาดาลเขต 2 (สุพรรณบุรี) แยกเป็น (1) บ่อสูบน้ำใต้ดินของรัฐกำหนดให้อัตราการสูบน้ำสูงสุดอยู่ที่ 16 ชั่วโมงต่อวัน และ (2) บ่อสูบน้ำใต้ดินของเอกชน กำหนดให้อัตราการสูบน้ำสูงสุดอยู่ที่ 24 ชั่วโมงต่อวัน ทำการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินภายใต้สภาวะการไหลแบบคงที่ (Steady State Flow) และสภาวะการไหลแบบไม่คงที่ (Transient Flow) ทั้งนี้การจำลองการไหลของน้ำใต้ดินภายใต้สภาวะการไหลแบบคงที่ที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, K) ในแนวแกน X (K_x) แกน Y (K_y) และแกน Z (K_z) ส่วนการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินภายใต้สภาวะการไหลแบบไม่คงที่ที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ (Storage Coefficients) ได้แก่ Specific Storage (S_s) และ Specific Yield (S_y) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของค่าระดับน้ำใต้ดินในแบบจำลองใกล้เคียงกับค่าระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์มากที่สุด ซึ่งแสดงผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ

ในตารางที่ 2-37 และให้ค่าประสิทธิผลของการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในภาพที่ 2-41 และภาพที่ 2-42

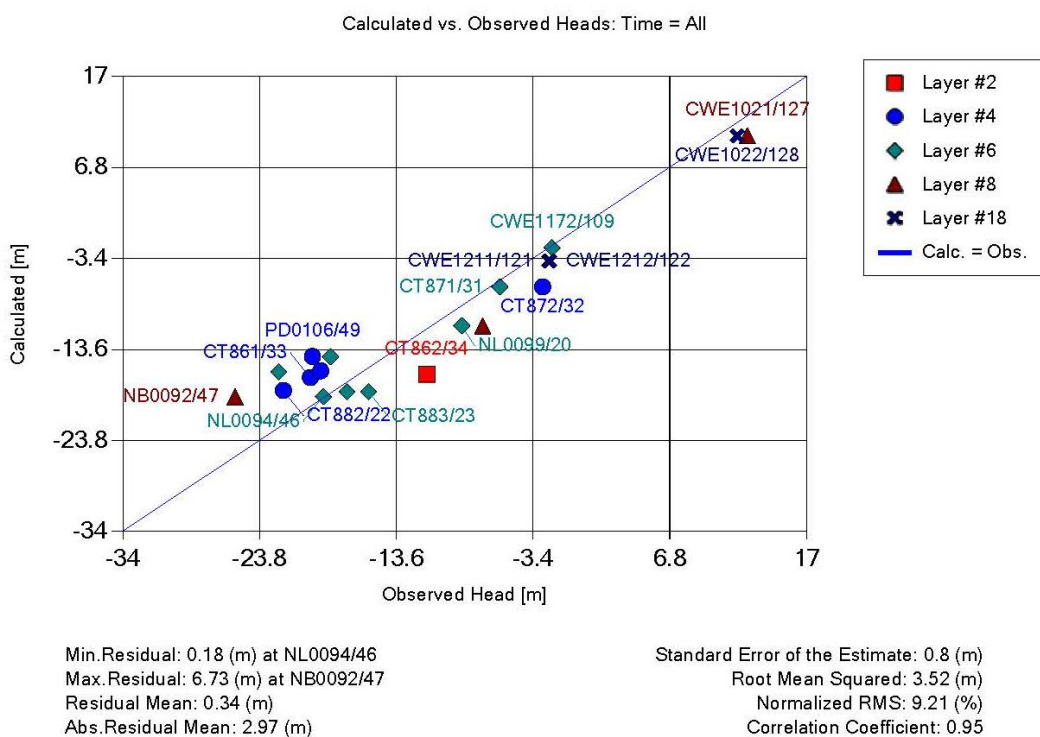
ตารางที่ 2-37 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินจากการเปรียบเทียบแบบจำลอง

ชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน	สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (เมตร/วัน)		ความพรุน ประสิทธิผล	สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ	
	Kx และ Ky	Kz		Sy	Ss
ชั้นดินเหนียวระหว่างชั้น (Aquitard)	4×10^{-5} (1×10^{-3}) ^{1/}	4×10^{-6} (1×10^{-4}) ^{1/}	0.03 (0.03) ^{1/}	0.03 (0.03) ^{1/}	1×10^{-5} (1×10^{-5}) ^{1/}
ชั้นหินอุ้มน้ำกรุงเทพฯ (Bangkok Aquifer, BK)	10-40 (20-59) ^{1/}	1.0-4.0 (2-5.9) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	8×10^{-6} (8×10^{-6}) ^{1/}
ชั้นหินอุ้มน้ำพระประแดง (Phra Pradaeng Aquifer, PD)	10-16 (0.1-75) ^{1/}	1.0-1.6 (0.01-7.5) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	9×10^{-5} (9×10^{-5}) ^{1/}
ชั้นหินอุ้มน้ำนครหลวง (Nakhon Luang Aquifer, NL)	10-40 (0.1-67) ^{1/}	1.0-4.0 (0.01-6.7) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	8×10^{-5} (8×10^{-5}) ^{1/}
ชั้นหินอุ้มน้ำนันทบุรี (Nonthaburi Aquifer, NB)	13-42 (5-25) ^{1/}	1.3-4.2 (0.5-2.5) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	5×10^{-5} (5×10^{-5}) ^{1/}
ชั้นหินอุ้มน้ำสามโคก (Sam Khok Aquifer, SK)	5-8 (0.39-5.90) ^{1/}	0.5-0.8 (0.39-5.90) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	1×10^{-5} (1×10^{-5}) ^{1/}
ชั้นหินอุ้มน้ำพญาไท (Phaya Thai Aquifer, PT)	5-8 (0.39-5.90) ^{1/}	0.5-0.8 (0.039-0.59) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	1×10^{-5} (1×10^{-5}) ^{1/}
ชั้นหินอุ้มน้ำธนบุรี (Thonburi Aquifer, TB)	5-8 (0.39-5.90) ^{1/}	0.5-0.8 (0.039-0.59) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	1×10^{-5} (1×10^{-5}) ^{1/}
ชั้นหินอุ้มน้ำปากน้ำ (Pak Nam Aquifer, PN)	5-8 (0.39-5.90) ^{1/}	0.5-0.8 (0.039-0.59) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	0.20 (0.20) ^{1/}	1×10^{-5} (1×10^{-5}) ^{1/}
ชั้นดินกั้นน้ำ (Aquitard)	1 (1×10^{-3}) ^{1/}	0.1 (1×10^{-4}) ^{1/}	0.03 (0.03) ^{1/}	0.03 (0.03) ^{1/}	3×10^{-7} (1×10^{-5}) ^{1/}
ชั้นหินแข็ง (Hard Rock Aquifer)	6-55 (0.1-9) ^{1/}	0.6-5.5 (1×10^{-4}) ^{1/}	0.10 (0.10) ^{1/}	0.10 (0.10) ^{1/}	5×10^{-4} (5×10^{-4}) ^{1/}

หมายเหตุ : ^{1/}ค่าในวงเล็บเป็นค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่แนะนำโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551)



ภาพที่ 2-41 ประสิทธิภาพของการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่



ภาพที่ 2-42 ประสิทธิภาพของการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะไม่คงที่

จากการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินจากการปรับเทียบแบบจำลอง VISUAL MODFLOW พบว่าอยู่ในช่วงค่าที่แนะนำโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาลที่ศึกษาไว้ในปี พ.ศ. 2551 นอกจากนี้ค่าความสามารถในการนำน้ำของดินที่ได้จากการปรับเทียบยังสอดคล้องตามผลการศึกษาของ Heath ในปี ค.ศ. 1983 โดยค่าความสามารถในการนำน้ำของดินผันแปรตามประเภทของดิน (Heath, 1983) ตามที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 1 ภาพที่ 1-25 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ S_s ของชั้นหินแข็งและชั้นดินเหนียวที่กำหนดในแบบจำลองอ้างอิงจากผลการศึกษาของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลในปี พ.ศ. 2551 ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่แนะนำโดย Domenico ในปี ค.ศ. 1972 (Domenico, 1972) ดังแสดงในตารางที่ 2-38

ตารางที่ 2-38 ช่วงข้อมูลสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำที่แนะนำโดย Domenico

ชนิดดิน	สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ S_s
ดินเหนียวพลาสติก (Plastic Clay)	$2.0 \times 10^{-2} - 2.6 \times 10^{-3}$
ดินเหนียวแน่น (Stiff Clay)	$2.6 \times 10^{-3} - 1.3 \times 10^{-3}$
ดินเหนียวปานกลาง-แข็ง (Medium-Hard Clay)	$1.3 \times 10^{-3} - 9.2 \times 10^{-4}$
ดินทรายแบบสภาพดินหลวม (Loose Sand)	$1.0 \times 10^{-3} - 4.9 \times 10^{-4}$
ดินทรายแบบสภาพดินแน่น (Dense Sand)	$2.0 \times 10^{-4} - 1.3 \times 10^{-4}$
ดินกรวยแบบสภาพดินบนทรายแน่น (Dense Sandy Gravel)	$1.0 \times 10^{-4} - 4.9 \times 10^{-5}$
หินแข็งมีรอยแยกหรือรอยเชื่อม (Rock, Fissured, Jointed)	$6.9 \times 10^{-5} - 3.3 \times 10^{-6}$
หินแข็ง (Rock, Sound)	$< 3.3 \times 10^{-6}$

ที่มา : Domenico (1972)

ประสิทธิภาพของการปรับเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสถานะคงที่และสถานะไม่คงที่พบว่า ค่าระดับน้ำเฉลี่ยที่คำนวณจากแบบจำลอง VISUAL MODFLOW และค่าระดับน้ำเฉลี่ยจากบ่อสังเกตการณ์มีค่าความเบี่ยงเบนคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 9.36 และ 9.21 ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงถึง 0.96 สำหรับการจำลองในสถานะคงที่ และ 0.95 สำหรับการจำลองในสถานะไม่คงที่ อย่างไรก็ตาม ผลการปรับเทียบพบว่าให้ค่าผลต่างของค่าระดับน้ำเฉลี่ยที่คำนวณจากแบบจำลองและค่าระดับน้ำเฉลี่ยจากบ่อสังเกตการณ์สูงบางบ่อ

2.6.4 ผลการจำลองสมดุลลงน้ำใต้ดิน

สมดุลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาระหว่างปี พ.ศ. 2543-2559 ได้จากผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินภายใต้สถานะไม่คงที่ด้วยโปรแกรม MODFLOW Flex ดังแสดงในตารางที่ 2-28 โดยปริมาณน้ำไหลเข้าหลักทั้งหมด (Inflow) มาจากน้ำจากพื้นที่ใกล้เคียงที่ไหลเข้ามาบริเวณขอบเขตของพื้นที่ศึกษา (Head Flow Boundary) การซึมของน้ำผิวดินลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (Recharge) และการซึมจากแม่น้ำ (River Leakage) ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำไหลเข้าทั้งหมด 42.25%, 37.87% และ 5.00% ตามลำดับ ส่วนปริมาณน้ำไหลออกหลักทั้งหมด (Outflow) เกิดจากการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาออกสู่ภายนอกผ่านทางบริเวณขอบเขตของพื้นที่ศึกษา (Head Flow Boundary) การระเหย

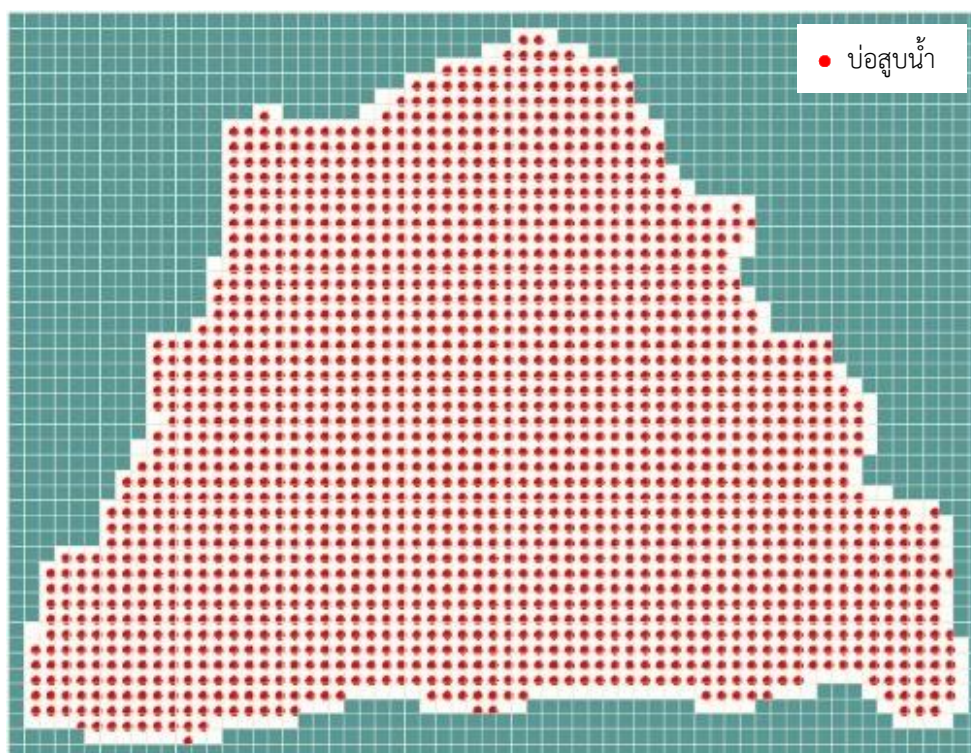
(Evapotranspiration) และบ่อสูบน้ำใต้ดิน (Pumping Wells) ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำไหลออกทั้งหมด 64.63%, 14.90% และ 9.96% ตามลำดับ ตามข้อมูลสรุปในตารางที่ 2-39

ตารางที่ 2-39 สมดุลบ่อน้ำใต้ดินจากการจำลองในสถานะไม่คงที่ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559

สมดุลบ่อน้ำใต้ดินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559		ปริมาณน้ำเฉลี่ย	
		ลูกบาศก์เมตรต่อวัน	เปอร์เซ็นต์
ปริมาณน้ำไหลเข้า	Storage	7.99×10^8	14.88
	Constant Head	0.00	0.00
	Pumping Wells	0.00	0.00
	River Leakage	2.68×10^8	5.00
	Evapotranspiration	0.00	0.00
	Head Flow Boundary	2.26×10^9	42.25
	Recharge	2.03×10^9	37.87
	ปริมาณน้ำไหลเข้าทั้งหมด	5.36×10^9	–
ปริมาณน้ำไหลออก	Storage	5.63×10^8	10.49
	Constant Head	0.00	0.00
	Pumping Wells	5.35×10^8	9.96
	River Leakage	9.09×10^5	0.02
	Evapotranspiration	7.99×10^8	14.90
	Head Flow Boundary	3.47×10^9	64.63
	Recharge	0.00	0.00
	ปริมาณน้ำไหลออกทั้งหมด	3.37×10^9	–
Percent Discrepancy		-0.12	

2.6.5 อัตราการสูบน้ำปลอดภัย

อัตราการสูบน้ำปลอดภัย (Permissible Yield) สำหรับงานวิจัยนี้คืออัตราการสูบน้ำใต้ดินที่ทำให้ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาลดลง -1 เมตรต่อปี โดยกำหนดบ่อสูบน้ำในทุกเซลล์ของแบบจำลองน้ำใต้ดินดังแสดงในภาพที่ 2-43 เพื่อกระจายการสูบน้ำทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 2-43 การกำหนดบ่อสูบน้ำเพื่อหาอัตราการสูบน้ำปลอดภัยในพื้นที่ศึกษา

จากนั้นกำหนดค่าอัตราการสูบน้ำใต้ดินของแต่ละบ่อด้วยหลักลองผิดลองถูก (Trial and Error) จนกระทั่งผลที่ได้คือระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาลดลงในปริมาณใกล้เคียง -1 เมตร ต่อปี มากที่สุด โดยอัตราการสูบน้ำปลอดภัยที่คำนวณได้อยู่ที่ 185,760 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งในปัจจุบัน อัตราการสูบน้ำที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาอยู่ที่ 115,494 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็น 62% ของปริมาณสูบน้ำปลอดภัย

แม้ว่าอัตราการสูบน้ำใต้ดินในปัจจุบันต่ำกว่าอัตราการสูบน้ำปลอดภัย แต่งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้บ่อเติมน้ำใต้ดินระดับต้นเพื่อทดแทนระดับน้ำใต้ดินที่ลดลงจากปี พ.ศ. 2543-2559 และรองรับการเพิ่มของอัตราการสูบน้ำใต้ดินในพื้นที่ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

2.6.6 ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่ลดลงที่เกิดขึ้นจากการสูบน้ำใต้ดิน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาผลกระทบของระดับน้ำใต้ดินอันเนื่องมาจากการสูบน้ำใต้ดินในปี พ.ศ. 2543-2559 โดยจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะปกติและในสภาวะที่ไม่มีการสูบน้ำใต้ดินเกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว และนำแบบจำลองทั้งสองมาเปรียบเทียบค่าระดับน้ำใต้ดินในเพื่อหาค่าระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่ลดลงที่เกิดขึ้นจากการสูบน้ำใต้ดิน โดยผลที่ได้แสดงดังในภาพที่ 2-44 จากการสูบน้ำใต้ดินที่เกิดขึ้นทำให้ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินลดลง -0.50 เมตร ถึง -2.00 เมตร เรียงจากทางเหนือและตะวันออกของแบบจำลองไปยังทางตะวันตกของแบบจำลอง ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินลดลงมากที่สุดในบริเวณพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน

เมื่อ j = ลำดับของตัวแปร (Thematic Layer)

W_j = ค่า Weight ของตัวแปรลำดับ j

W'_j = ค่า Normalized Weight ของตัวแปรลำดับ j

ค่า Normalized score สามารถคำนวณด้วยสมการที่ 2-6

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{ij\max}} ; j=1,2,\dots,n \quad i=1,2,\dots,m \quad \text{-----}(2-6)$$

เมื่อ i = ลำดับของหมวดหมู่ (Class)

j = ลำดับของตัวแปร (Thematic Layer)

a_{ij} = ค่า Score ของ Class ลำดับ i และ Thematic Layer ลำดับ j

a'_{ij} = ค่า Normalized Score ของ Class ลำดับ i และ Thematic Layer ลำดับ j

n = จำนวนตัวแปร (Thematic Layer)

m = จำนวนหมวดหมู่ (Class)

จากนั้นนำค่า Normalized Weight และค่า Normalized Score มาคำนวณค่าความเหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดิน (Value of Suitability) โดยการ Overlay กลุ่มข้อมูล Thematic Layer ทั้งหมดด้วยสมการที่ 2-7

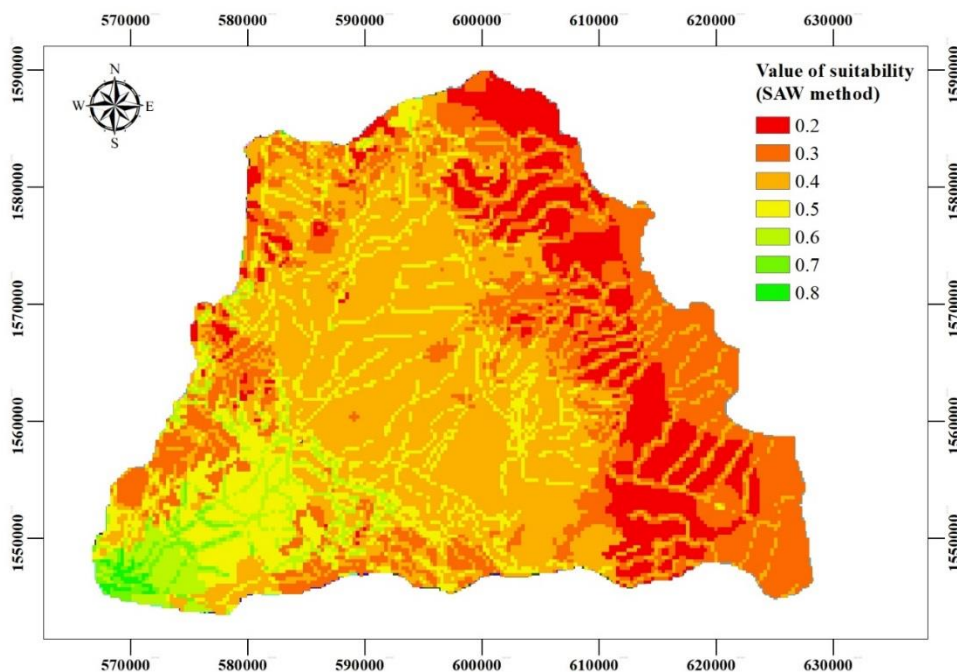
$$A_i = \sum_{j=1}^n W'_j a'_{ij} ; i=1,2,\dots,m \quad \text{-----}(2-7)$$

เมื่อ A_i = ค่าความเหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดิน (Value of Suitability)

ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าความเหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดิน (Value of Suitability) ในแต่ละเซลล์โดยมีค่า 0-1 ดังแสดงในภาพที่ 2-45

ตารางที่ 2-40 ข้อมูลสำหรับพิจารณาหาพื้นที่ที่เหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดินด้วยวิธีการรวม
หลักเกณฑ์แบบถ่วงน้ำหนัก

Thematic Layer	Weight (0-10)	Normalized Weight	Class	Score (0-10)	Normalized Score
เนื้อดิน (Soil Texture)	7	0.225806452	Clay	0	0
			Silty-Clay	1	0.1
			Sandy-Clay	2	0.2
			Clay-Loam	3	0.3
			Silty-Clay-Loam	4	0.4
			Sandy-Clay-Loam	5	0.5
			Loam	6	0.6
			Silty-Loam	7	0.7
			Sandy-Loam	8	0.8
			Loamy-Sand	9	0.9
			Very Stony Soil	10	1
ความลึกจากผิวดินถึงระดับน้ำใต้ดิน (Depth to Groundwater Table)	5	0.161290323	0 – < 2 m	1	0.1
			2 – < 4 m	3	0.3
			4 – < 6 m	5	0.5
			6 – < 8 m	7	0.7
			8 – 10 m	9	0.9
			> 10 m	10	1
ระดับน้ำใต้ดินที่ลดลง พ.ศ. 2543-2559 (Groundwater Drawdown during 2000-2016)	8	0.258064516	> 20 m	10	1
			15 – 20 m	8	0.8
			10 – < 15 m	6	0.6
			5 – < 10 m	4	0.4
			0 – < 5 m	2	0.2
			< 0 m	0	0
ระยะทางจากแหล่งน้ำผิวดิน (Distance from Surface Water Source)	5	0.161290323	0 – < 50 m	10	1
			50 – < 100 m	8	0.8
			100 – < 150 m	6	0.6
			150 – 200	4	0.4
			> 200 m	2	0.2
ความชัน (Slope)	6	0.193548387	0% – < 2%	10	1
			2% – < 4%	8	0.8
			4% – < 8%	6	0.6
			8% – < 12%	2	0.2

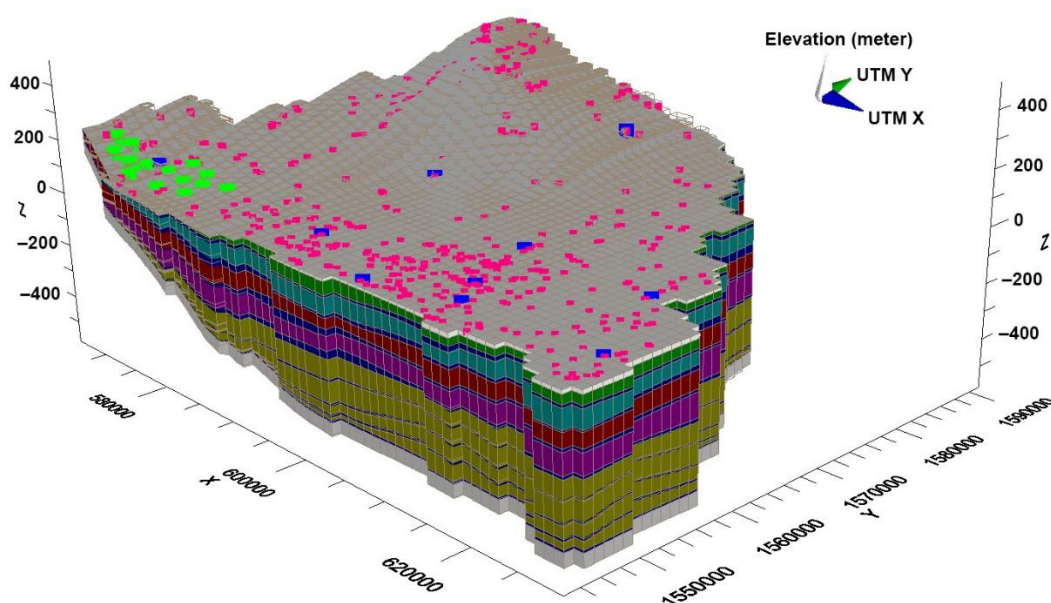


ภาพที่ 2-45 แผนที่แสดงค่าความเหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดิน

พื้นที่ที่มีค่าความเหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดินสูงสุดอยู่ในบริเวณโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวนทางตะวันตกของพื้นที่ศึกษา ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย (Sandy loam) ความลึกจากผิวดินถึงระดับน้ำใต้ดิน 0–2 เมตร ระดับน้ำใต้ดินลดลง 10–20 เมตร จากปี พ.ศ. 2543–2559 ห่างจากแหล่งน้ำผิวดินไม่เกิน 200 เมตร โดยอยู่ใกล้บริเวณคลองและมีความชัน 0–2%

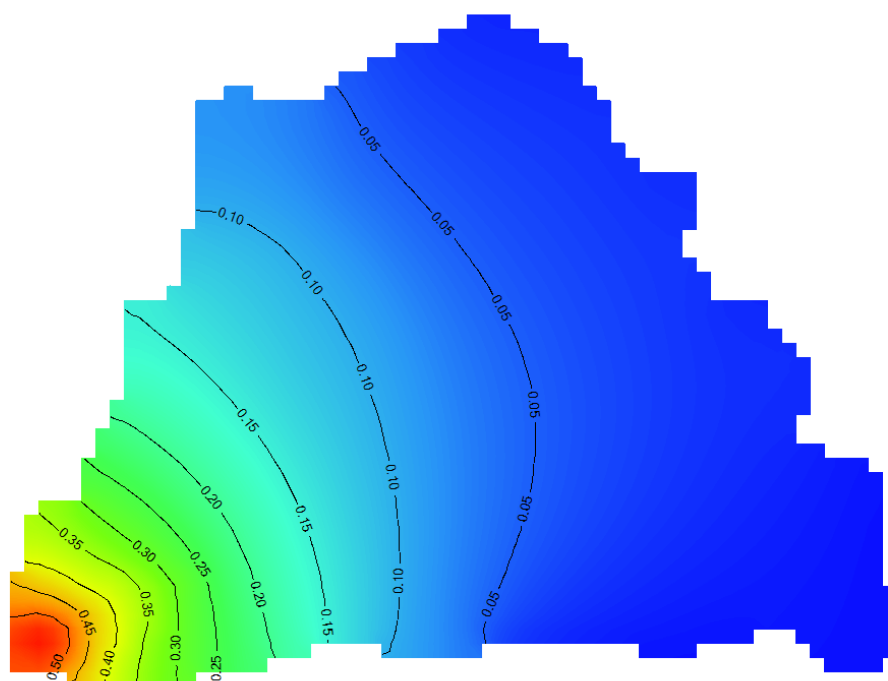
2.6.8 ผลการจำลองโครงการเติมน้ำใต้ดินด้วยบ่อเติมน้ำใต้ดินระดับต้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองบ่อเติมน้ำใต้ดินโดยเลือกพื้นที่ตำแหน่งบ่อเติมน้ำใต้ดินอยู่ในบริเวณที่มีค่าความเหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดิน 0.6–0.8 ลักษณะของบ่อเติมน้ำใต้ดินที่ใช้เป็นบ่อเติมน้ำใต้ดินระดับต้นความลึก 8 เมตร จำนวน 14 บ่อ อัตราการเติมน้ำใต้ดินในแต่ละบ่อเท่ากับ 200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน บ่อเติมน้ำใต้ดินระดับต้นมีลักษณะคล้ายกับบ่อสูบน้ำ โดยสามารถดัดแปลงบ่อสูบน้ำที่ไม่ใช้แล้วเป็นบ่อเติมน้ำใต้ดินได้ ดังแสดงในภาพที่ 2-46



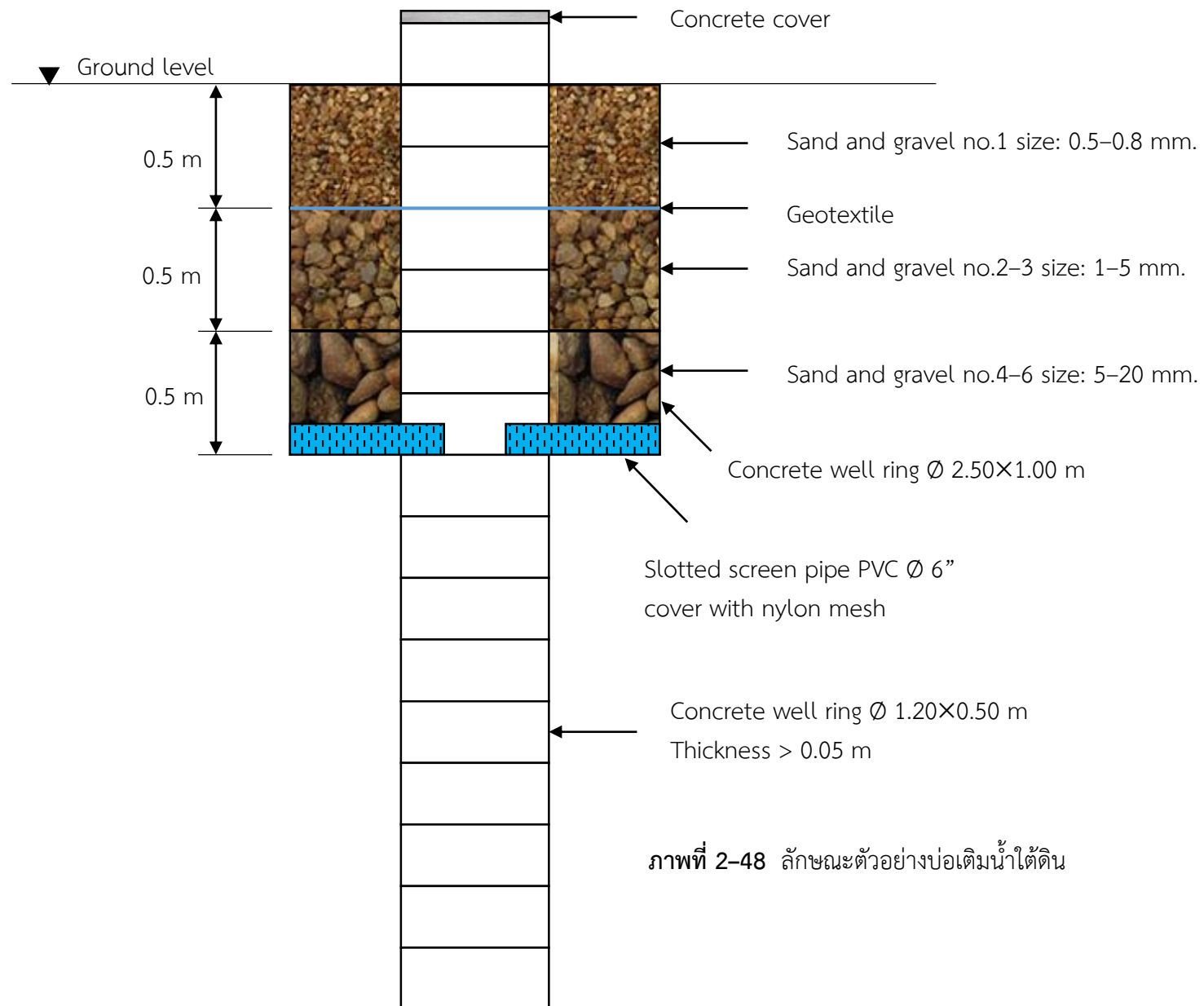
ภาพที่ 2-46 แบบจำลอง 3 มิติ แสดงลักษณะชั้นน้ำใต้ดินและตำแหน่งของบ่อต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา

ผลการจำลองเพิ่มบ่อเติมน้ำใต้ดินจำนวน 14 บ่อ ในปี พ.ศ. 2543–2559 พบว่าระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้น 0.05–0.50 เมตร โดยเพิ่มขึ้นมากที่สุดในบริเวณตำแหน่งของบ่อเติมน้ำใต้ดินซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน ดังแสดงในภาพที่ 2-47



ภาพที่ 2-47 เส้นชั้นแสดงระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มสูงขึ้นในพื้นที่ศึกษาจากการจำลองเพิ่มบ่อเติมน้ำใต้ดินในปี พ.ศ. 2543–2559

จากการจำลองพบว่า บ่อเติมน้ำใต้ดินระดับต้นส่งผลให้ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้นทั่วทั้งบริเวณพื้นที่ศึกษาตั้งแต่ 0.00–0.50 เมตร โดยในพื้นที่ตำแหน่งที่ตั้งของบ่อเติมน้ำใต้ดินเป็นพื้นที่ที่ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด 0.20–0.50 เมตร รายละเอียดและลักษณะบ่อเติมน้ำแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2-48 และภาพที่ 2-49 (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล และกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2562)



ภาพที่ 2-48 ลักษณะตัวอย่างบ่อเติมน้ำใต้ดิน

Concrete well ring $\varnothing 1.20 \times 0.50$ m
Thickness > 0.05 m

Brass cover

Concrete cover

Concrete well ring $\varnothing 2.50 \times 1.00$ m

ภาพที่ 2-49 ลักษณะตัวอย่างหน้าตัดบ่อเติมน้ำใต้ดิน

ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำบาดาล และกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2562)

Concrete well ring $\varnothing 1.20 \times 0.50$ m
Thickness > 0.05 m

Slotted screen pipe PVC $\varnothing 6''$
cover with nylon mesh

Sand and gravel no.4-6 size: 5-20 mm.

Concrete well ring $\varnothing 2.50 \times 1.00$ m

บทที่ 3

ข้อวิจารณ์

3.1 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง SWAP กับวิธีเอมไพริคัล

งานวิจัยนี้ได้พยายามนำผลลัพธ์ของอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง SWAP มาเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ เพื่อยืนยันผลที่ได้ว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ โดยได้คัดเลือกกลุ่มวิธีเอมไพริคัลในการประมาณการอัตราการเติมน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา 4 สมการหลัก ได้แก่ (1) สมการของ Chaturvedi (2) สมการของ Sehgal (3) สมการของ Krishna Rao และ (4) สมการของ Bhattacharya สำหรับรายละเอียดของแต่ละสมการเอมไพริคัลได้สรุปไว้ในบทที่ 1 ตารางที่ 1-3 จากผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง SWAP กับวิธีเอมไพริคัล และผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนในการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553 และการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560 พบว่า อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง SWAP มีค่าใกล้เคียงกับสมการของ Krishna Rao โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination- R^2) สูงถึง 0.73 และยังพบว่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินผันแปรตามปัจจัยฝน กล่าวคือ ปีที่มีปริมาณฝนรายปีน้อยให้ค่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินน้อยดังเช่น ปี พ.ศ. 2547 และ พ.ศ. 2549 และปีที่มีปริมาณฝนรายปีสูงส่งผลให้สัดส่วนของอัตราการเติมน้ำใต้ดินสูงตามไปด้วยดังเช่น ปี พ.ศ. 2553 อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยรายปีของอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ประมาณการด้วยสมการของ Chaturvedi, Sehgal และ Bhattacharya ให้ค่าสูงกว่าที่ได้จากแบบจำลอง SWAP ในขณะที่ค่าเฉลี่ยรายปีของอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ประมาณการด้วยสมการของ Krishna Rao ให้ค่าต่ำกว่าที่ได้จากแบบจำลอง SWAP ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-1 และภาพที่ 3-1 ตารางที่ 3-2 และภาพที่ 3-6 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปีที่ได้จากแบบจำลอง SWAP กับวิธีเอมไพริคัลจากการเปรียบเทียบแบบจำลองและการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง และแสดงผลในรูปค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination- R^2) พบว่า มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.56-0.73 ในกรณีของการเปรียบเทียบแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3-2 ถึงภาพที่ 3-5 และมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.72 ในกรณีของการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3-7 ถึงภาพที่ 3-10

ตารางที่ 3-1 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง SWAP กับวิธีเอมไพริกัลและความคลาดเคลื่อนในการปรับเทียบแบบจำลอง
ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553

ปี พ.ศ.	ปริมาณฝน รายปี (มิลลิเมตร)	อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (มิลลิเมตรต่อปี)					รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)			
		สมการเอมไพริกัล				แบบจำลอง SWAP	สมการเอมไพริกัล			
		CF	SF	KRF	BF		CF	SF	KRF	BF
2543	881.81	764.50	150.47	238.44	91.12	149.38	34.29	53.67	93.64	35.38
2544	913.00	779.08	152.73	243.24	94.77	151.62	25.38	115.88	32.59	24.26
2545	971.33	788.06	154.10	246.16	97.01	152.97	65.67	157.72	8.58	64.54
2546	879.73	787.02	153.95	245.82	96.76	152.82	27.38	64.49	84.57	28.51
2547	562.67	449.62	75.60	82.84	9.92	75.41	30.97	38.20	34.71	30.78
2548	855.58	709.35	141.41	219.31	77.34	140.41	91.89	169.79	27.82	90.89
2549	686.65	577.07	115.06	164.61	35.41	114.34	75.40	124.95	4.25	74.67
2550	919.10	818.85	158.66	255.89	104.71	157.49	28.46	125.68	25.50	27.28
2551	899.97	789.94	154.39	246.76	97.48	153.26	78.09	170.46	21.19	76.96
2552	786.16	647.27	130.04	195.55	61.82	129.16	65.35	130.86	2.87	64.46
2553	1,115.94	1,102.04	193.70	332.32	180.61	192.20	147.78	9.16	160.87	149.28
ค่าสูงสุด	449.62	75.60	82.84	9.92	75.41	39.66	60.97 ^{1/}	105.53 ^{1/}	45.14 ^{1/}	60.64 ^{1/}
ค่าเฉลี่ย	746.62	143.65	224.63	86.09	142.64	120.76	0.56 ^{2/}	0.57 ^{2/}	0.73 ^{2/}	0.56 ^{2/}
ค่าต่ำสุด	1,102.04	193.70	332.32	180.61	192.20	341.48				

หมายเหตุ : ^{1/} ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)

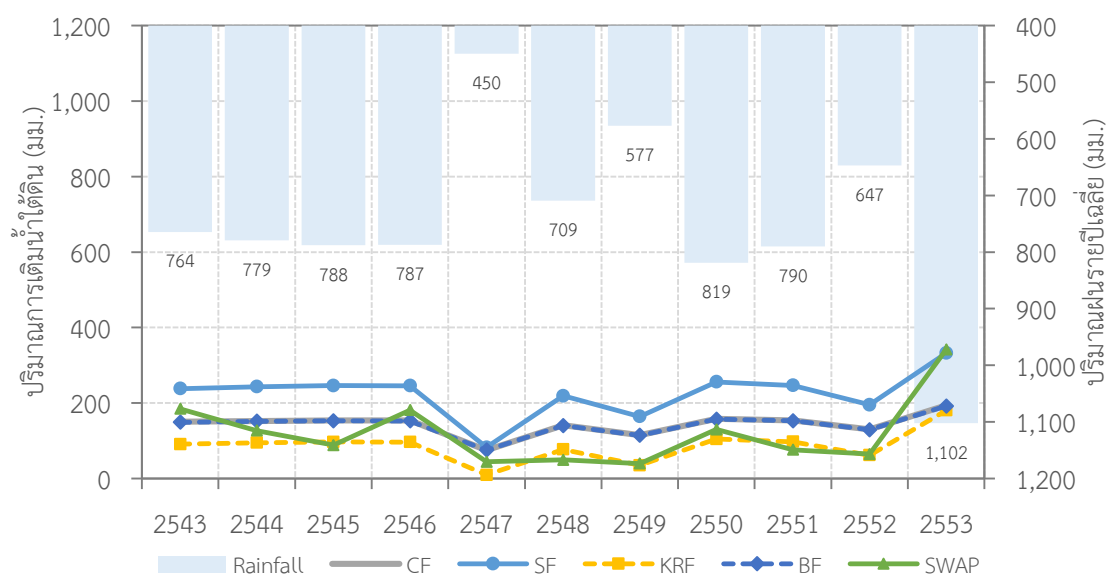
^{2/} ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination-R²)

ตารางที่ 3-2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง SWAP กับวิธีเอมไพริกัลและความคลาดเคลื่อนในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560

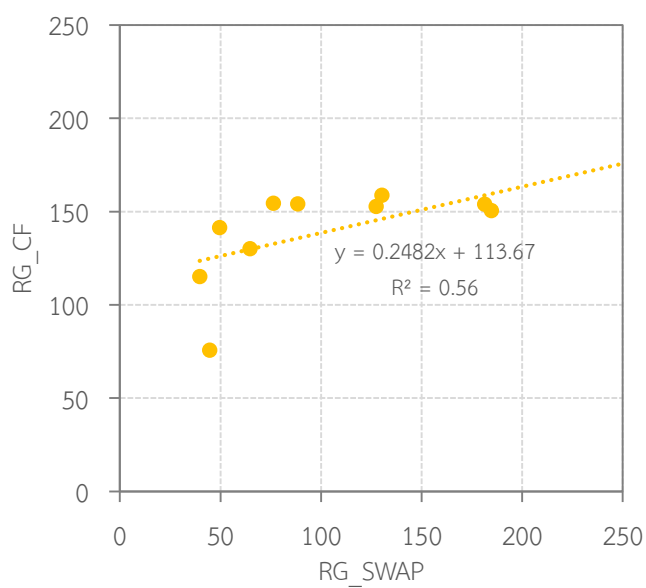
ปี พ.ศ.	ปริมาณฝน รายปี (มิลลิเมตร)	อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (มิลลิเมตรต่อปี)					รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)			
		สมการเอมไพริกัล				แบบจำลอง SWAP	สมการเอมไพริกัล			
		CF	SF	KRF	BF		CF	SF	KRF	BF
2554	829.38	160.18	259.14	107.34	158.99	160.76	0.58	98.38	53.41	1.77
2555	847.88	162.79	264.75	111.97	161.58	121.19	41.60	143.56	9.22	40.39
2556	995.57	181.71	305.84	148.89	180.32	201.26	19.55	104.58	52.37	20.94
2557	954.80	176.79	295.07	138.70	175.44	163.00	13.79	132.07	24.30	12.44
2558	698.58	139.54	215.37	74.64	138.55	80.09	59.44	135.28	5.45	58.46
2559	763.83	150.37	238.21	90.96	149.27	129.69	20.68	108.52	38.73	19.59
2560	908.70	170.96	282.39	127.17	169.67	134.23	36.74	148.16	7.05	35.45
ค่าสูงสุด	139.54	215.37	74.64	138.55	80.09	139.54	27.48 ^{1/}	124.36 ^{1/}	27.22 ^{1/}	27.00 ^{1/}
ค่าเฉลี่ย	163.19	265.82	114.24	161.98	141.46	163.19	0.72 ^{2/}	0.72 ^{2/}	0.72 ^{2/}	0.72 ^{2/}
ค่าต่ำสุด	181.71	305.84	148.89	180.32	201.26	181.71				

หมายเหตุ : ^{1/} ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)

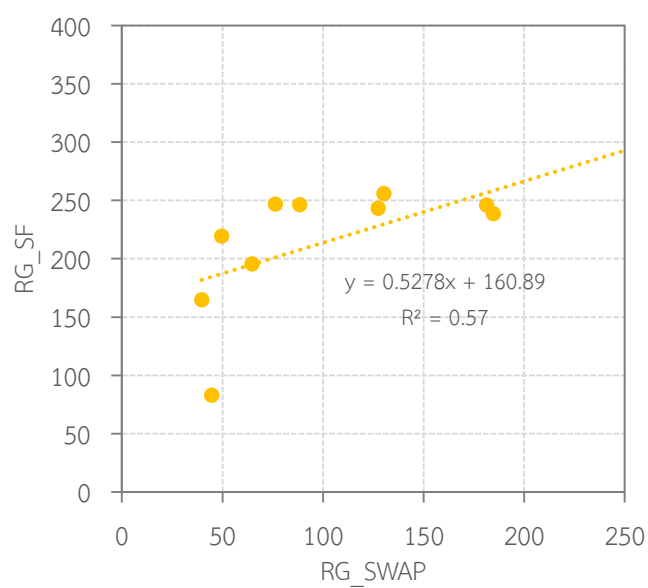
^{2/} ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination-R²)



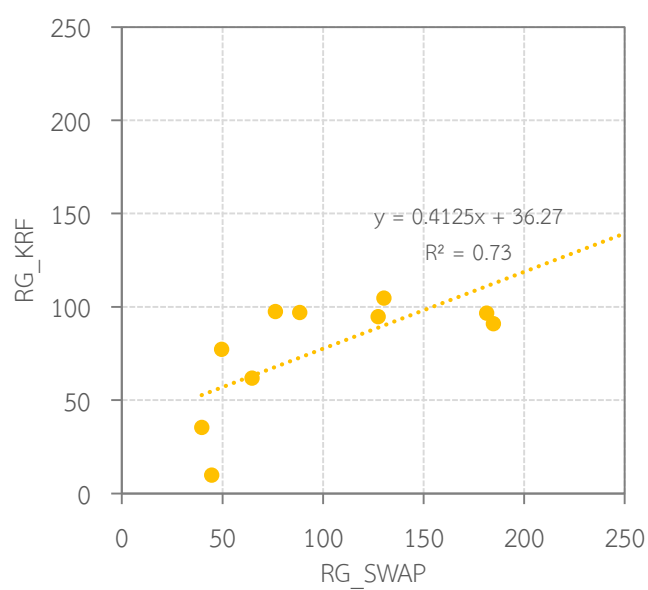
ภาพที่ 3-1 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง SWAP และวิธีเอมไพริคัล ที่ประมาณการจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายปีในการปรับเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



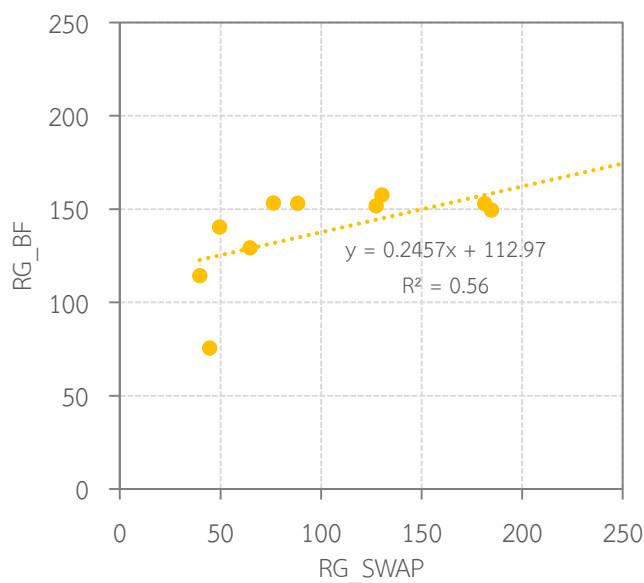
ภาพที่ 3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง SWAP และวิธีเอมไพริคัล CF ในการปรับเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



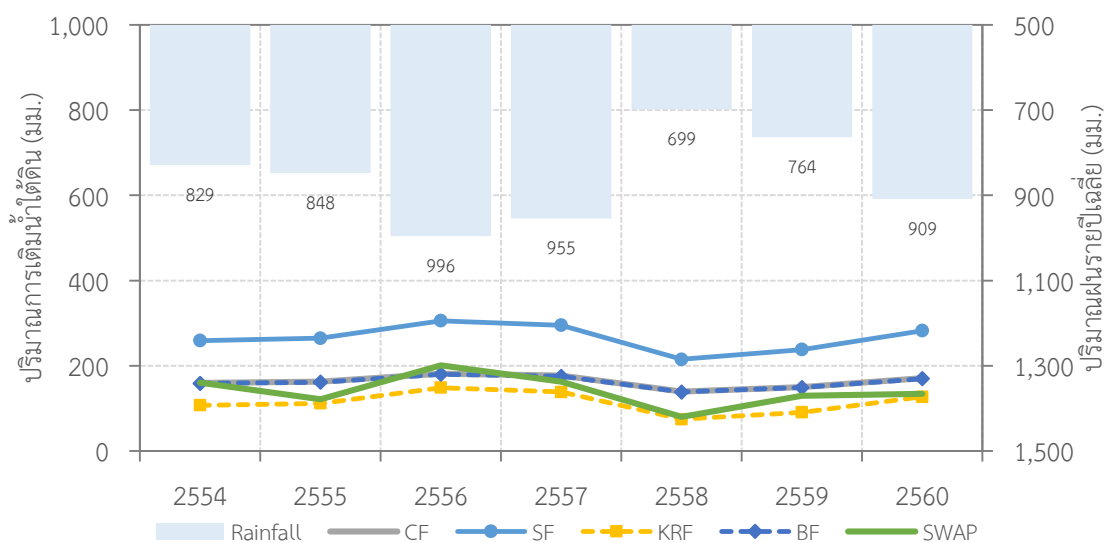
ภาพที่ 3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง SWAP และวิธี
เอมไพริคัล SF ในการปรับเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



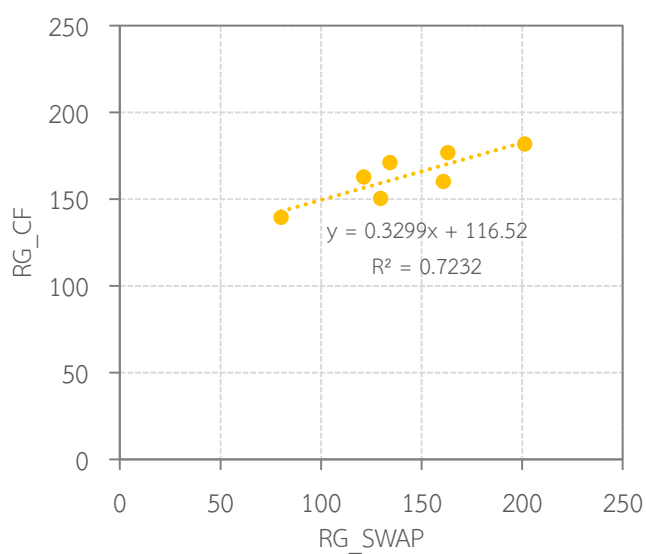
ภาพที่ 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง SWAP และวิธี
เอมไพริคัล KRF ในการปรับเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



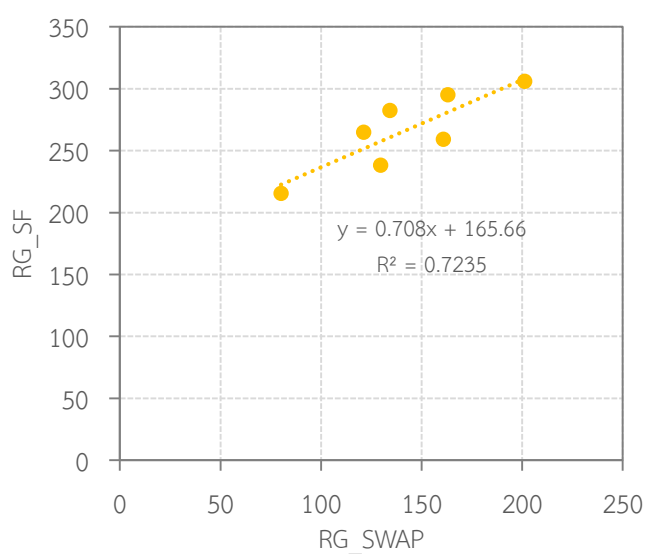
ภาพที่ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง SWAP และวิธีเอมไพริกัล BF ในการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



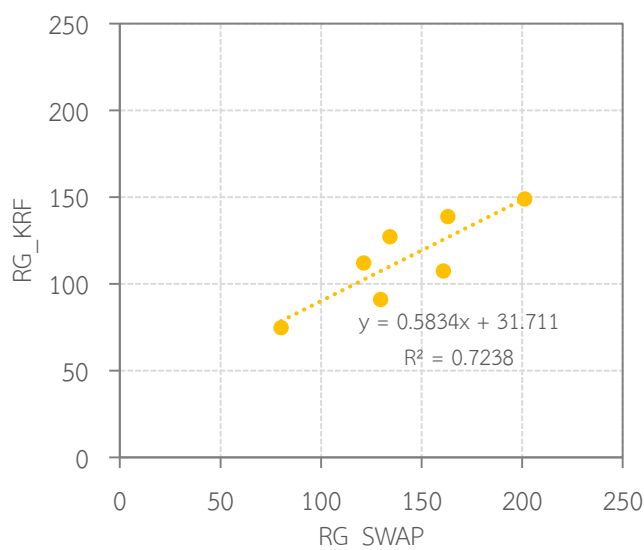
ภาพที่ 3-6 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง SWAP และวิธีเอมไพริกัล BF ที่ประมาณการจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายปีในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560



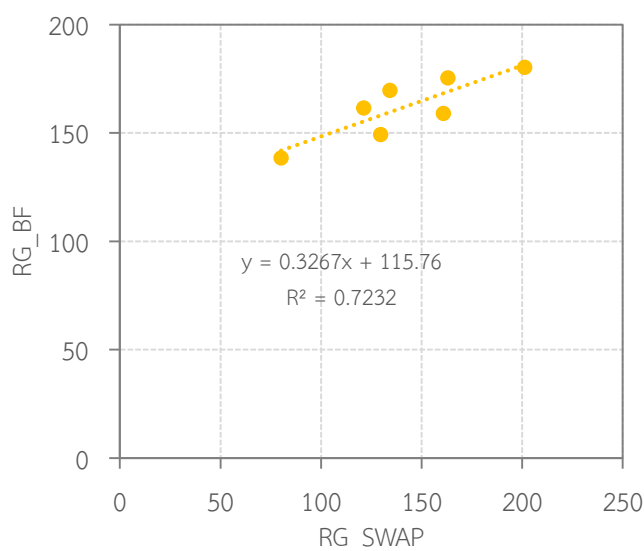
ภาพที่ 3-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง SWAP และวิธีเอมไพริกัล CF ในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560



ภาพที่ 3-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง SWAP และวิธีเอมไพริกัล SF ในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560



ภาพที่ 3-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง SWAP และวิธีเอมไพริกัล KRF ในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560



ภาพที่ 3-10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง SWAP และวิธีเอมไพริกัล BF ในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560

3.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS กับวิธีเอมไพริกัล

ในทำนองเดียวกัน งานวิจัยนี้ได้นำผลลัพธ์ของอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS มาเปรียบเทียบกับวิธีเอมไพริกัล 4 สมการหลัก ได้แก่ (1) สมการของ Chaturvedi (Chaturvedi Formula, CF) ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1973 (2) สมการของ Sehgal (Sehgal Formula,

SF) ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1973 (3) สมการของ Krishna Rao (Krishna Rao Formula, KRF) ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1970 และ (4) สมการของ Bhattacharya (Bhattacharya Formula, BF) ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1954 เพื่อยืนยันผลที่ได้ว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ โดยผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS กับวิธีเอนไพริกัลและผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนในการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553 และการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560 พบว่า อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS มีค่าใกล้เคียงกับสมการของ Chaturvedi และ Bhattacharya ค่อนข้างมากทั้งรูปแบบและอัตราการเติมน้ำที่ผันแปรตามปัจจัยฝน กล่าวคือ ปีที่มีปริมาณฝนรายปีน้อยให้ค่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินน้อยดังเช่น ปี พ.ศ. 2547 และปีที่มีปริมาณฝนรายปีสูงส่งผลให้สัดส่วนของอัตราการเติมน้ำใต้ดินสูงตามไปด้วยดังเช่น ปี พ.ศ. 2553 อย่างไรก็ตาม อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ประมาณการด้วยสมการของ Sehgal ให้ค่าสูงกว่าที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS ในขณะที่อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ประมาณการด้วยสมการของ Krishna Rao ให้ค่าต่ำกว่าที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-3 และภาพที่ 3-11 ตารางที่ 3-4 และภาพที่ 3-16 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS กับวิธีเอนไพริกัลจากการเปรียบเทียบแบบจำลองและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และแสดงผลในรูปแบบค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination- R^2) พบว่า มีค่าสูงกว่า 0.79 ในกรณีของการเปรียบเทียบแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3-12 ถึงภาพที่ 3-15 และมีค่าต่ำลงในช่วง 0.43-0.52 ในกรณีของการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3-17 ถึงภาพที่ 3-20

ตารางที่ 3-3 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS กับวิธีเอมไพริกัลและความคลาดเคลื่อนในการปรับเทียบแบบจำลอง ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553

ปี พ.ศ.	ปริมาณฝน รายปี (มิลลิเมตร)	อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (มิลลิเมตรต่อปี)					รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)			
		สมการเอมไพริกัล				แบบจำลอง WETSPASS	สมการเอมไพริกัล			
		CF	SF	KRF	BF		CF	SF	KRF	BF
2543	881.81	167.42	274.73	114.54	166.17	188.81	21.4	85.9	74.3	22.6
2544	913.00	171.52	283.60	123.90	170.22	176.16	4.6	107.4	52.3	5.9
2545	971.33	178.81	299.48	141.40	177.44	217.11	38.3	82.4	75.7	39.7
2546	879.73	167.15	274.13	113.92	165.89	171.94	4.8	102.2	58.0	6.0
2547	562.67	111.60	157.51	18.80	110.92	136.42	24.8	21.1	117.6	25.5
2548	855.58	163.86	267.04	106.67	162.64	170.63	6.8	96.4	64.0	8.0
2549	686.65	137.42	210.93	56.00	136.45	150.14	12.7	60.8	94.1	13.7
2550	919.10	172.30	285.30	125.73	171.00	189.26	17.0	96.0	63.5	18.3
2551	899.97	169.83	279.93	119.99	168.55	195.96	26.1	84.0	76.0	27.4
2552	786.16	153.82	245.54	85.85	152.69	157.71	3.9	87.8	71.9	5.0
2553	1,115.94	195.19	335.63	184.78	193.67	204.37	9.2	131.3	19.6	10.7
ค่าสูงสุด	1115.94	195.19	335.63	184.78	193.67	217.11	15.4 ^{1/}	86.8 ^{1/}	69.7 ^{1/}	16.6 ^{1/}
ค่าเฉลี่ย	861.09	162.63	264.89	108.33	161.42	178.05	0.79 ^{2/}	0.79 ^{2/}	0.80 ^{2/}	0.79 ^{2/}
ค่าต่ำสุด	562.67	111.60	157.51	18.80	110.92	136.42				

หมายเหตุ : ^{1/} ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)

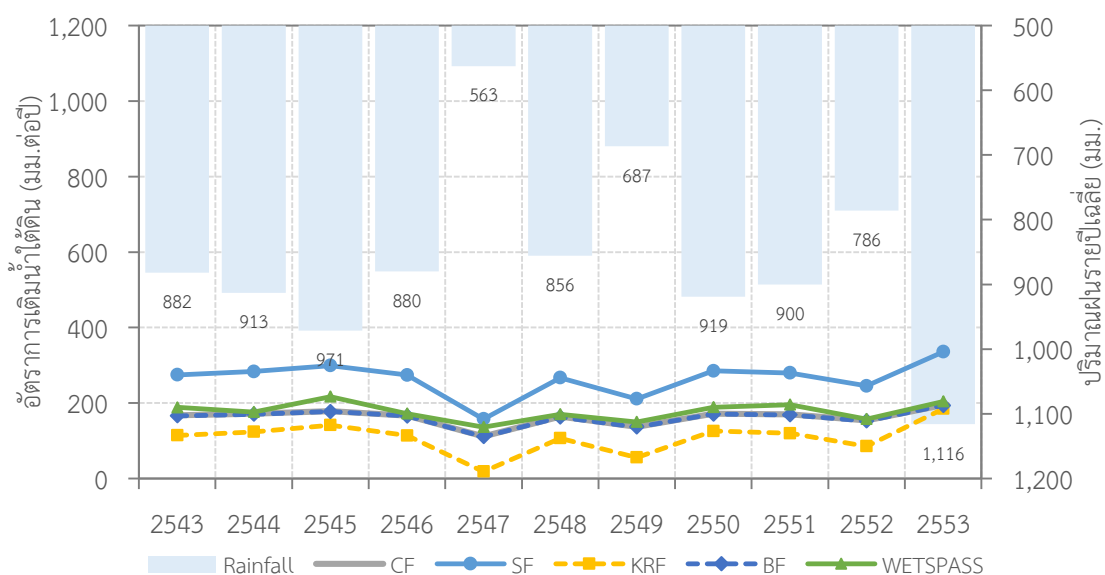
^{2/} ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination-R²)

ตารางที่ 3-4 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS กับวิธีเอมไพริกัลและความคลาดเคลื่อนในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560

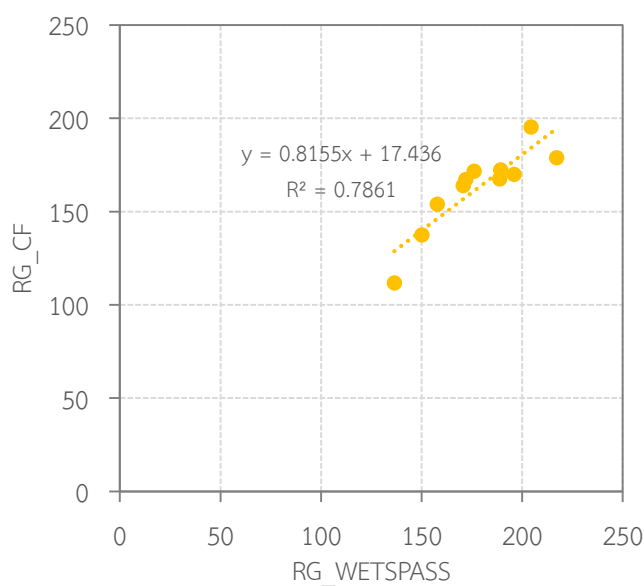
ปี พ.ศ.	ปริมาณฝนรายปี (มิลลิเมตร)	อัตราการเติมน้ำใต้ดิน (มิลลิเมตรต่อปี)					รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)			
		สมการเอมไพริกัล				แบบจำลอง WETSPASS	สมการเอมไพริกัล			
		CF	SF	KRF	BF		CF	SF	KRF	BF
2554	1,000.67	182.31	307.16	150.20	180.91	193.87	11.6	113.3	43.7	13.0
2555	995.17	181.66	305.73	148.55	180.27	182.79	1.1	122.9	34.2	2.5
2556	1,075.04	190.77	325.81	172.51	189.29	185.31	5.5	140.5	12.8	4.0
2557	1,056.54	188.72	321.27	166.96	187.26	178.27	10.4	143.0	11.3	9.0
2558	861.07	164.62	268.67	108.32	163.39	164.43	0.2	104.2	56.1	1.0
2559	886.76	168.08	276.16	116.03	166.82	155.53	12.6	120.6	39.5	11.3
2560	1,089.74	192.37	329.37	176.92	190.88	244.24	51.9	85.1	67.3	53.4
ค่าสูงสุด	1,089.74	192.37	329.37	176.92	190.88	244.24	13.3 ^{1/}	118.5 ^{1/}	37.9 ^{1/}	13.4 ^{1/}
ค่าเฉลี่ย	861.07	164.62	268.67	108.32	163.39	155.53	0.43 ^{2/}	0.52 ^{2/}	0.52 ^{2/}	0.51 ^{2/}
ค่าต่ำสุด	995.00	181.22	304.88	148.50	179.83	186.35				

หมายเหตุ : ^{1/} ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)

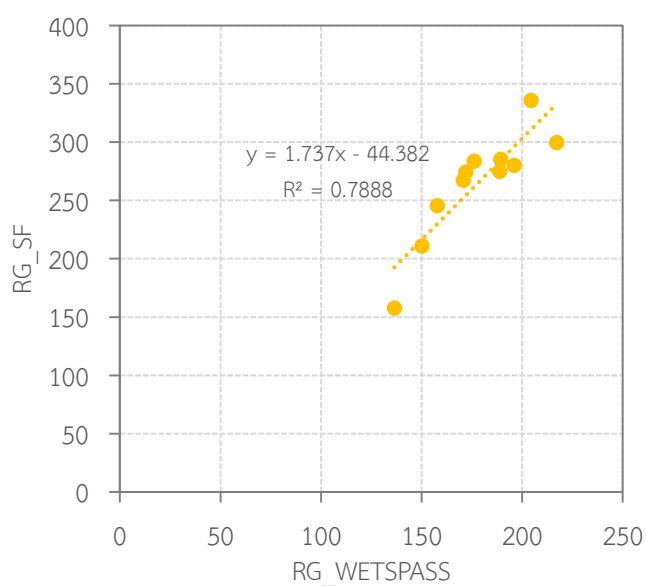
^{2/} ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination-R²)



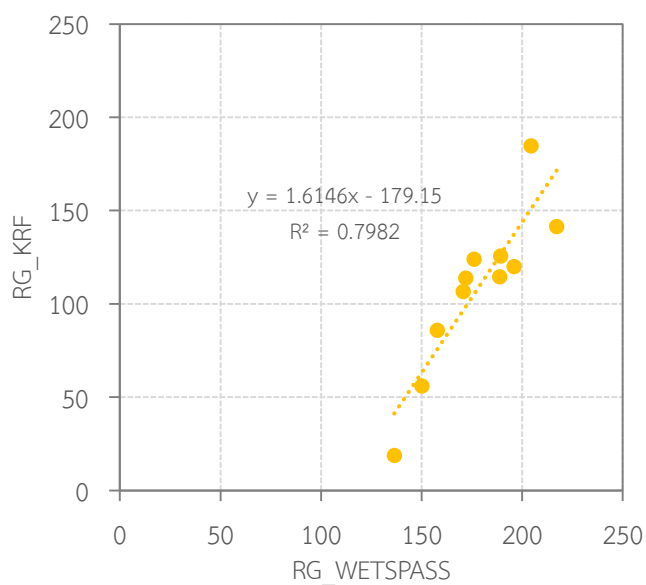
ภาพที่ 3-11 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง WETSPASS และวิธีเอ็มไพริกัล ที่ประมาณการจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายปีในการปรับเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



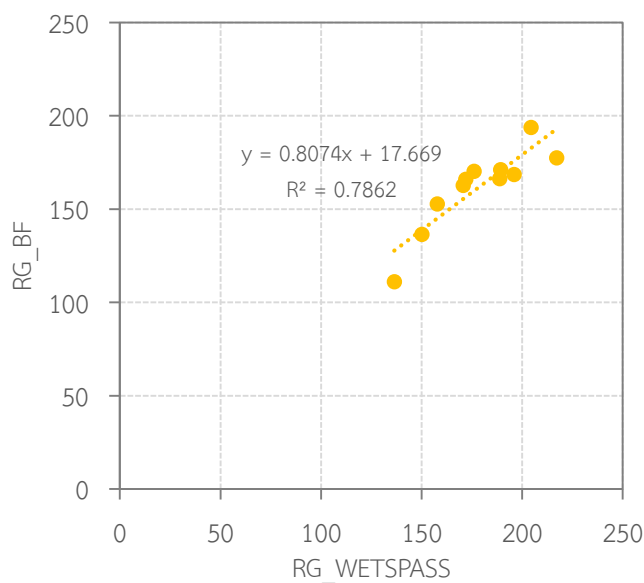
ภาพที่ 3-12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และวิธีเอ็มไพริกัล CF ในการปรับเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



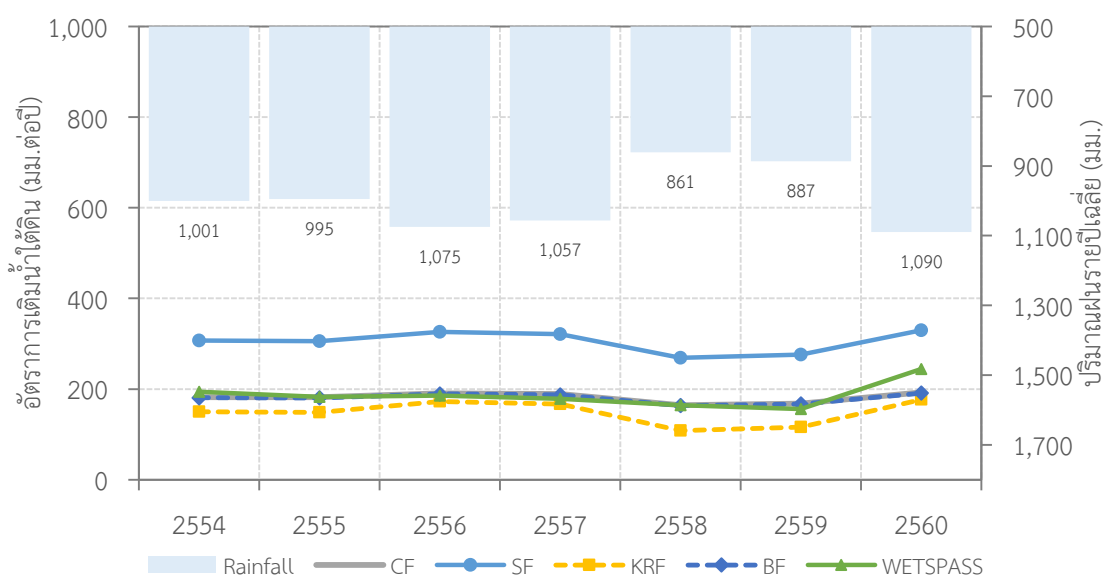
ภาพที่ 3-13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และวิธี
เอมไพริคัล SF ในการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



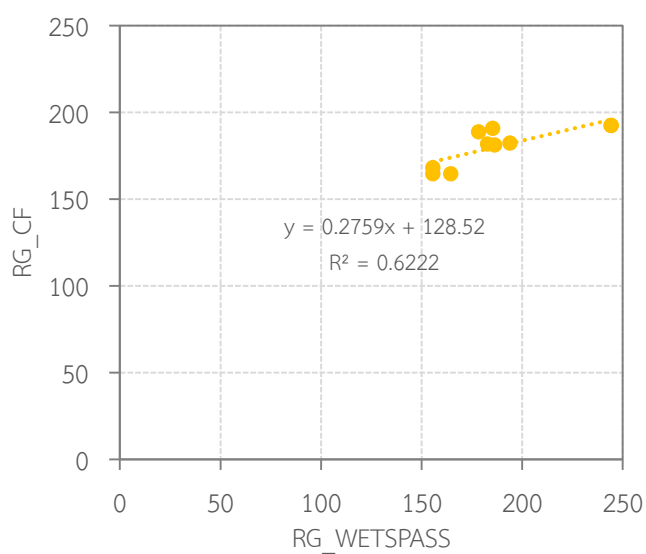
ภาพที่ 3-14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และวิธี
เอมไพริคัล CF ในการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



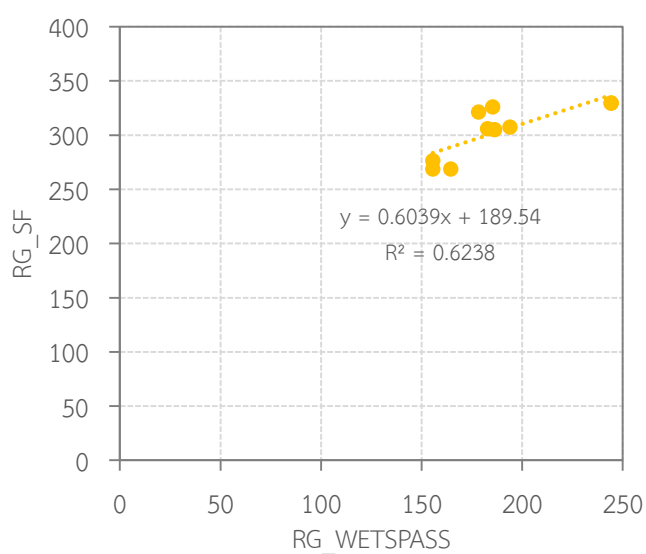
ภาพที่ 3-15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และวิธีเอ็มไพริกัล CF ในการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



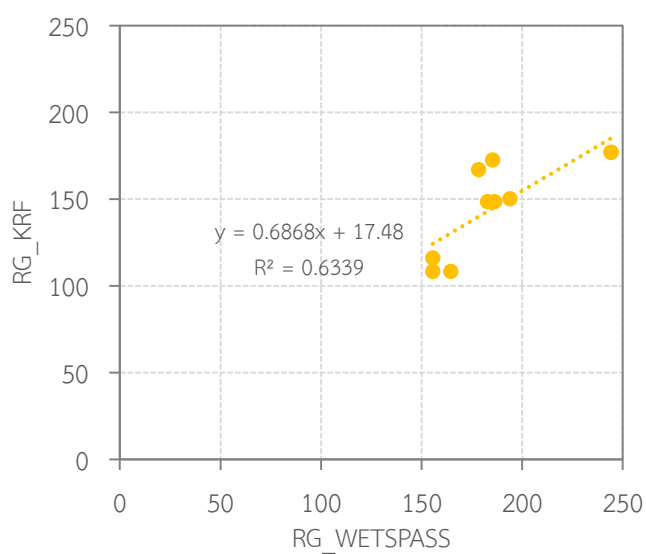
ภาพที่ 3-16 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลอง WETSPASS และวิธีเอ็มไพริกัลที่ประมาณการจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายปีในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560



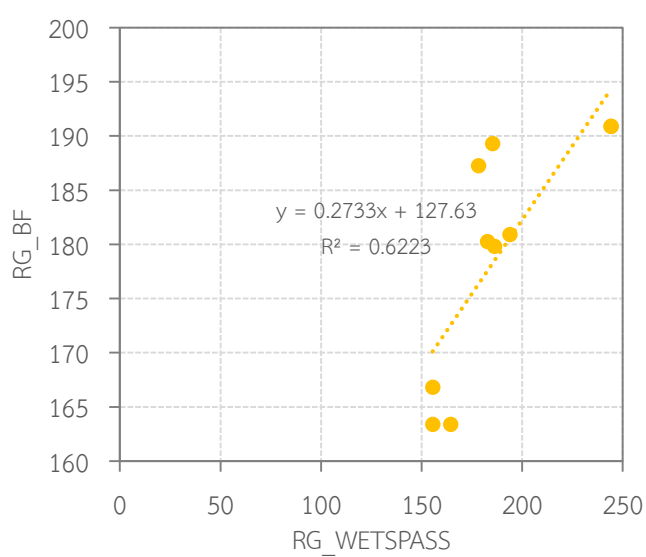
ภาพที่ 3-17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และวิธีเอ็มไพริ กัล CF ในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560



ภาพที่ 3-18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และวิธีเอ็มไพริ กัล SF ในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560



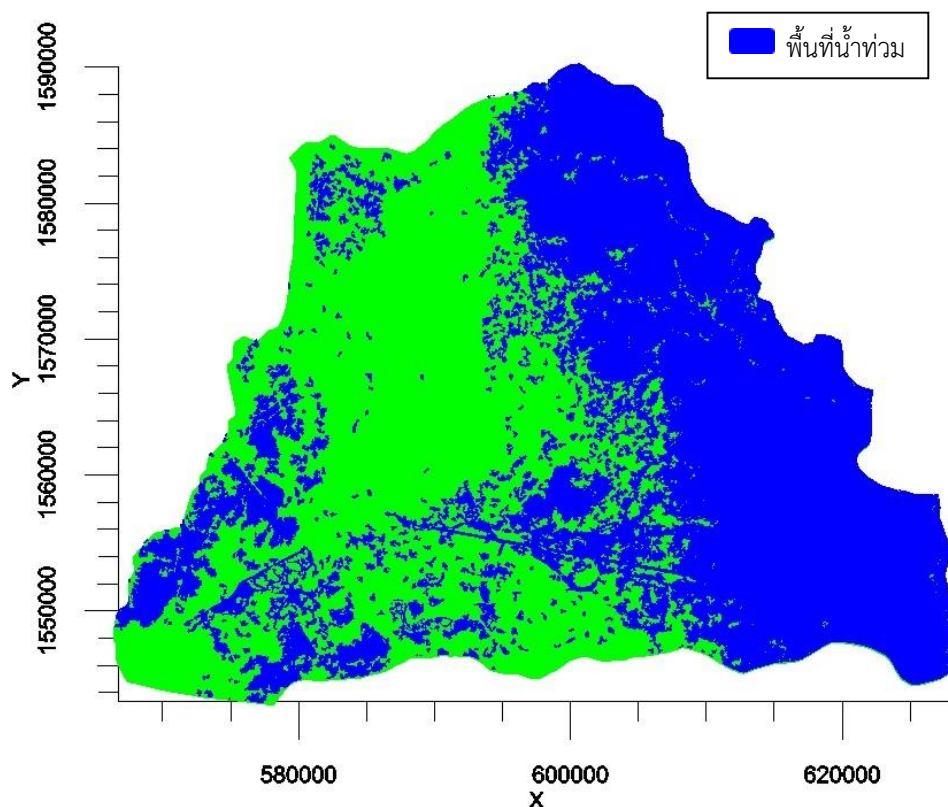
ภาพที่ 3-19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และวิธีเอมไพริกัล KRF ในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560



ภาพที่ 3-20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง WETSPASS และวิธีเอมไพริกัล BF ในการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554-2560

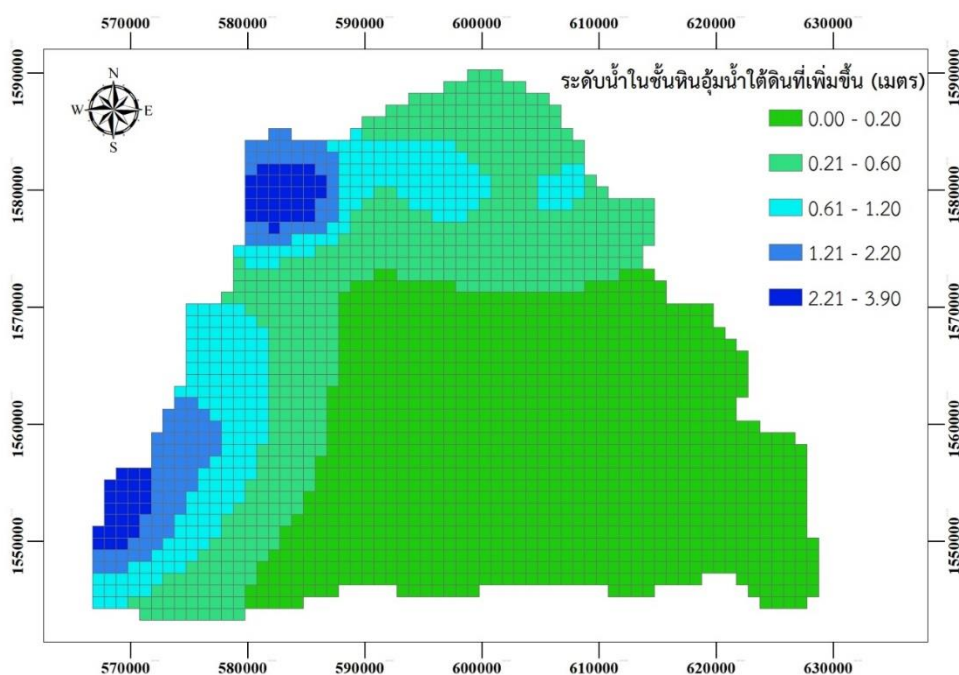
3.3 ผลกระทบของเหตุการณ์อุทกภัยปี พ.ศ. 2554 ต่อระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองเหตุการณ์อุทกภัยที่เกิดขึ้นระหว่างเดือนสิงหาคม–ธันวาคม ปี พ.ศ. 2554 ด้วยโปรแกรม MODFLOW Flex โดยใช้แผนที่น้ำท่วมจากสำนักงานวิทยาการอวกาศและภูมิสารสนเทศ (GISTDA) ดังแสดงในภาพที่ 3-21 และข้อมูลระดับน้ำที่ท่วมในพื้นที่จากรายงานผลโครงการบริการข้อมูลเพื่อการเฝ้าระวังและเตือนภัยน้ำท่วมจังหวัดนครปฐม ปี พ.ศ. 2554 (คณะอักษรศาสตร์ และ ศูนย์สารสนเทศทางภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2554) ซึ่งพื้นที่น้ำท่วมส่วนใหญ่อยู่บริเวณตะวันออกของพื้นที่ศึกษาในบริเวณพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบางเลนและบางส่วนในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน โดยระดับน้ำท่วมในพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ที่ 0.50–1.00 เมตร เหนือระดับพื้นดิน และ 0.30–0.50 เมตร ในบางพื้นที่



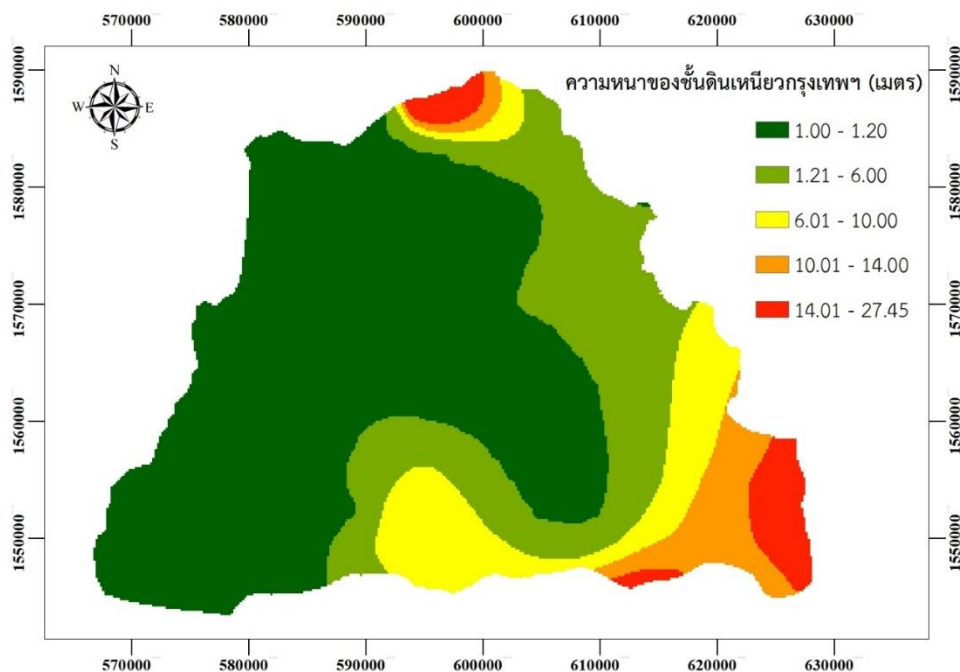
ภาพที่ 3-21 แผนที่แสดงพื้นที่น้ำท่วมในพื้นที่ศึกษาในปี พ.ศ. 2554

การจำลองการเกิดอุทกภัยในพื้นที่ศึกษากำหนดให้มีน้ำขังบนผิวดินในพื้นที่น้ำท่วมที่ระดับน้ำเฉลี่ย 0.50 เมตร เหนือระดับผิวดิน เป็นระยะเวลา 5 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม–ธันวาคม ปี พ.ศ. 2554 ผลที่ได้คือระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นในวันสุดท้ายของเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2554 ดังแสดงในภาพที่ 3-22



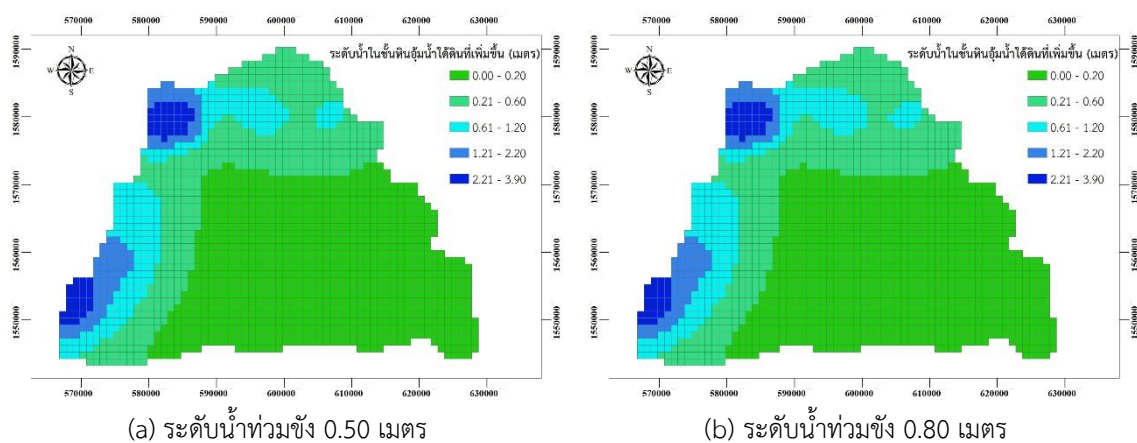
ภาพที่ 3-22 แผนที่แสดงระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการจำลองน้ำท่วมขังบนผิวดินในพื้นที่น้ำท่วมที่ระดับน้ำเฉลี่ย 0.50 เมตร เหนือระดับผิวดิน

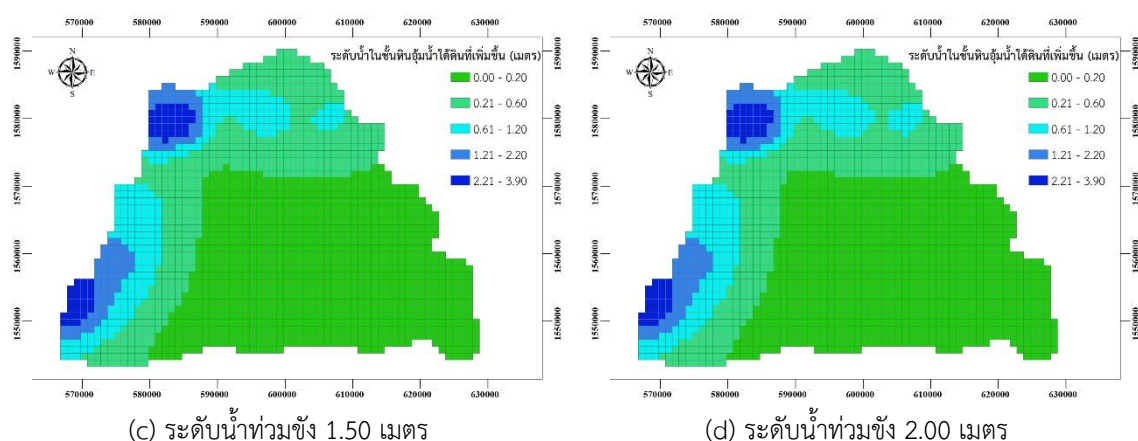
ผลของระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นในภาพที่ 3-22 ข้างต้นพบว่า พื้นที่ที่ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นสูง 1.21-2.20 และ 2.21-3.90 เมตร อยู่ในบริเวณตะวันตกของพื้นที่ศึกษาในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดเหตุการณ์น้ำท่วมผิวดินบางส่วน ตรงกันข้ามกับบริเวณตะวันออกของพื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ที่เกิดเหตุการณ์น้ำท่วมผิวดินทั่วทั้งพื้นที่ โดยพื้นที่ที่ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นสูงอยู่ในบริเวณที่มีความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ต่ำ ส่วนในพื้นที่ที่ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นน้อยอยู่ในบริเวณที่มีความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ สูง



ภาพที่ 3-23 แผนที่แสดงความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการเกิดอุทกภัยในพื้นที่ศึกษาโดยเปลี่ยนแปลงระดับน้ำที่ข่งบนผิวดินในพื้นที่น้ำท่วมเพื่อศึกษาผลกระทบของระดับความสูงของน้ำที่ท่วมขังผิวดินต่อระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน โดยกำหนดระดับน้ำที่ท่วมขังผิวดินเฉลี่ย 0.50, 0.80, 1.50 และ 2.00 เมตร ตามลำดับ โดยผลของระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นแสดงดังภาพที่ 2-24



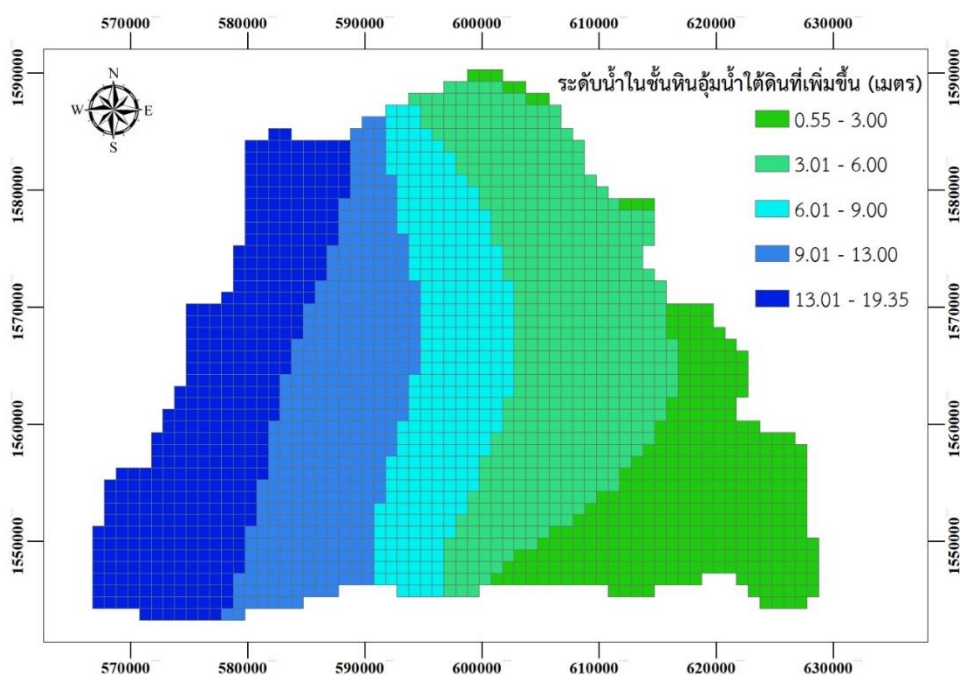


ภาพที่ 3-24 แผนที่แสดงระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการจำลองน้ำท่วมขังบนผิวดินในพื้นที่น้ำท่วมที่ระดับน้ำเหนือผิวดินเฉลี่ย 0.50, 0.80, 1.50 และ 2.00 เมตร

จากผลการจำลองในภาพที่ 3-24 พบว่า เมื่อระดับความสูงของน้ำที่ท่วมขังบนผิวดินเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ระดับความสูงของน้ำที่ท่วมขังบนผิวดินส่งผลต่อการเพิ่มสูงขึ้นของระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองน้ำท่วมขังบนผิวดินระดับน้ำเหนือระดับผิวดินเฉลี่ย 0.50 เมตร กับ 2.00 เมตร พบว่า มีพื้นที่ที่ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้น 0.00–0.20 เมตร ลดลง และถูกแทนที่ด้วยพื้นที่ที่ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้น 0.21–0.60 และ 0.61–1.20 เมตร

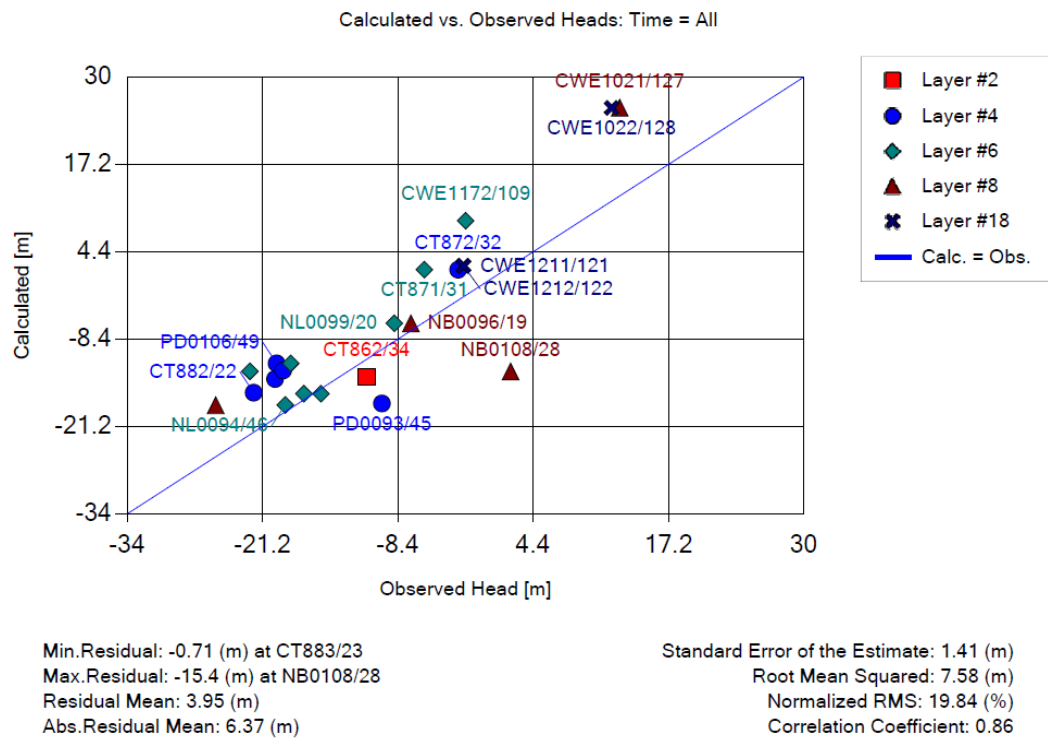
3.4 ผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการเติมน้ำใต้ดิน

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการเติมน้ำใต้ดินในแบบจำลอง VISUAL MODFLOW โดยนำค่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาจากผลของแบบจำลอง WETSPASS พบว่า ค่าระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินในแบบจำลองเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 3-25 โดยค่าระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้นมากในบริเวณพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน



ภาพที่ 3-25 แผนที่แสดงระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการเติมน้ำใต้ดิน

จากผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินด้วยค่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS พบว่า ค่าระดับน้ำใต้ดินที่จำลองได้ส่วนใหญ่สูงกว่าค่าระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ โดยมีประสิทธิผลของแบบจำลองลดลงเล็กน้อยดังแสดงในภาพที่ 3-26 ค่าเฉลี่ยกำลังสองมาตรฐานเท่ากับ 19.84% และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.86 อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง VISUAL MODFLOW ในงานวิจัยนี้ให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองมาตรฐานที่ยอมรับได้ต่ำกว่า 10% และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ยอมรับได้สูงกว่า 0.90



ภาพที่ 3-26 ประสิทธิภาพของการปรับเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินภายใต้สภาวะการไหลไม่คงที่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการเติมน้ำใต้ดิน

บทที่ 4

สรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุป

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ฐานข้อมูลน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลจำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินเฉพาะในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน-สองพี่น้อง-บางเลนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559 พบว่า มีทั้งสิ้น 546 บ่อ หรือคิดเป็น 13.31% ของจำนวนบ่อสูบน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ ประกอบด้วย บ่อสูบน้ำใต้ดินของรัฐ จำนวน 532 บ่อ ตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2443-2556 โดยสูบน้ำใต้ดินมาใช้เฉลี่ย 16 ชั่วโมงต่อวัน หรือคิดเป็นอัตราการสูบน้ำจากบ่อเฉลี่ย 215 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน รวมอัตราการสูบน้ำจากบ่อสูบน้ำใต้ดินของรัฐทั้งหมด 41.76 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และบ่อสูบน้ำใต้ดินของเอกชนมีจำนวน 14 บ่อ ตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2455-2557 โดยสูบน้ำใต้ดินมาใช้ตลอด 24 ชั่วโมงต่อวัน หรือคิดเป็นอัตราการสูบน้ำจากบ่อ 78.20 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน รวมอัตราการสูบน้ำจากบ่อสูบน้ำใต้ดินของเอกชนทั้งหมด 0.40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมปริมาณการสูบน้ำใต้ดินไปใช้เท่ากับ 42.16 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

4.1.2 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

(1) ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง SWAP รันผลแบบต่อเนื่องแยกตามชนิดดิน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560 พบว่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินผันแปรค่าตามชนิดดินกล่าวคือ อัตราการเติมน้ำใต้ดินของดินเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทรายมีค่าเฉลี่ยรายปี 24.25, 198.45 และ 242.51 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยอัตราการเติมน้ำใต้ดินเฉลี่ยของดินเหนียวมีค่าน้อยที่สุดตามคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดิน เปอร์เซ็นต์อัตราการเติมน้ำใต้ดินตลอดช่วงฤดูฝนเฉลี่ยของดินร่วนปนทรายระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมอยู่ที่ 64.65% ซึ่งสูงกว่าในช่วงฤดูแล้งระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายนที่มีเปอร์เซ็นต์อัตราการเติมน้ำใต้ดินอยู่ที่ 35.35% เนื่องมาจากปัจจัยฝนที่มีการเติมน้ำไปในชั้นน้ำใต้ดินอย่างไรก็ดี ผลการจำลองพบว่าเปอร์เซ็นต์อัตราการเติมน้ำใต้ดินในช่วงฤดูแล้งของดินเหนียวและดินร่วนสูงกว่าในช่วงฤดูฝน ซึ่งอาจเป็นผลจากคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดิน และข้อจำกัดของข้อมูลนำเข้าของการจำลองในแบบจำลอง SWAP ที่เป็นลักษณะแบบ 1 มิติ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์อัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปีเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่จากผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง SWAP ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2560 โดยอาศัยหลักการถ่วงค่าน้ำหนักตามสัดส่วนพื้นที่ตามชนิดดินเพียง 3 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทราย ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์พื้นที่เท่ากับ 42.88%, 42.83% และ 14.29% ตามลำดับ พบว่า อัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปีเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่มีค่าเท่ากับ 128.81 มิลลิเมตรต่อปี

(2) ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง SWAP กับวิธีเอมไพริคัลในการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543–2553 และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554–2560 พบว่า อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง SWAP มีค่าใกล้เคียงกับผลการของ Krishna Rao โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination– R^2) สูงถึง 0.73 ค่าเฉลี่ยรายปีของอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ประมาณการด้วยผลการของ Chaturvedi, Sehgal และ Bhattacharya ให้ค่าสูงกว่าที่ได้จากแบบจำลอง SWAP ในขณะที่ค่าเฉลี่ยรายปีของอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ประมาณการด้วยผลการของ Krishna Rao ให้ค่าต่ำกว่าที่ได้จากแบบจำลอง SWAP

(3) ผลการจำลองการเติมน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลอง WETSPASS ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2560 พบว่า อัตราการเติมน้ำใต้ดินผันแปรค่าระหว่างปี โดยอัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปีเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่ที่มีค่าเท่ากับ 181.3 มิลลิเมตรต่อปี อัตราการเติมน้ำใต้ดินเฉลี่ยตลอดช่วงฤดูแล้งระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายนมีค่าเท่ากับ 33.9 มิลลิเมตร หรือคิดเป็น 18.15% ของอัตราการเติมน้ำใต้ดินต่อปี ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินเฉลี่ยตลอดช่วงฤดูฝนระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมที่มีค่าเท่ากับ 147.4 มิลลิเมตร หรือคิดเป็น 81.85% ของอัตราการเติมน้ำใต้ดินต่อปี ทั้งนี้เนื่องมาจากปัจจัยฝนที่มีการเติมน้ำไปในชั้นน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ยังพบว่า ในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบางเลนซึ่งมีลักษณะดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวมีสัดส่วนอัตราการเติมน้ำใต้ดินน้อยกว่าพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้องและพนมทวนที่มีลักษณะดินส่วนใหญ่เป็นดินร่วนและดินร่วนปนทราย ตามลำดับ

(4) ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS กับวิธีเอมไพริคัลในการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2543–2553 และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างปี พ.ศ. 2554–2560 พบว่า อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS มีค่าใกล้เคียงกับผลการของ Chaturvedi และ Bhattacharya ค่อนข้างมากทั้งรูปแบบและอัตราการเติมน้ำที่ผันแปรตามปัจจัยฝน กล่าวคือ ปีที่มีปริมาณฝนรายปีน้อยให้ค่าอัตราการเติมน้ำใต้ดินน้อยดังเช่น ปี พ.ศ. 2547 และปีที่มีปริมาณฝนรายปีสูงส่งผลให้สัดส่วนของอัตราการเติมน้ำใต้ดินสูงตามไปด้วยดังเช่น ปี พ.ศ. 2553 อย่างไรก็ตาม อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ประมาณการด้วยผลการของ Sehgal ให้ค่าสูงกว่าที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS ในขณะที่อัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ประมาณการด้วยผลการของ Krishna Rao ให้ค่าต่ำกว่าที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS

(5) ผลการเปรียบเทียบอัตราการเติมน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง SWAP และ WETSPASS พบว่า อัตราการเติมน้ำใต้ดินรายปีเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่ที่ได้จากแบบจำลอง WETSPASS สูงกว่าที่ได้จากแบบจำลอง SWAP ซึ่งความแตกต่างนี้อาจเกิดขึ้นมาจากลักษณะของรูปแบบแบบจำลองและการนำเข้าข้อมูลของทั้งสองแบบจำลองที่มีความแตกต่างกัน กล่าวคือ แบบจำลอง SWAP เป็นแบบจำลองอนุพันธ์เชิงเลข 1 มิติ ที่จำลองการไหลของน้ำในชั้นดินไม่อิ่มตัวหรืออิ่มตัวบางส่วน ในขณะที่แบบจำลอง WETPASS เป็นแบบจำลองสมดุลของน้ำที่กระจายตัวตามพื้นที่ภายใต้สภาวะการไหลแบบสม่ำเสมอ

4.1.3 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

(1) สมดุลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาระหว่างปี พ.ศ. 2543–2559 ได้จากผลการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินภายใต้สภาวะไม่คงที่ด้วยโปรแกรม MODFLOW Flex โดยปริมาณน้ำไหลเข้าหลักทั้งหมด (Inflow) มาจากน้ำจากพื้นที่ใกล้เคียงที่ไหลเข้ามาบริเวณขอบเขตของพื้นที่ศึกษา (Head Flow Boundary) การซึมของน้ำผิวดินลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (Recharge) และการซึมจากแม่น้ำ (River Leakage) ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำไหลเข้าทั้งหมด 42.25%, 37.87% และ 5.00% ตามลำดับ ส่วนปริมาณน้ำไหลออกหลักทั้งหมด (Outflow) เกิดจากการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาออกสู่ภายนอกผ่านทางบริเวณขอบเขตของพื้นที่ศึกษา (Head Flow Boundary) การระเหย (Evapotranspiration) และบ่อสูบน้ำใต้ดิน (Pumping Wells) ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำไหลออกทั้งหมด 64.63%, 14.90% และ 9.96% ตามลำดับ

(2) อัตราการสูบน้ำปลอดภัยที่คำนวณได้เท่ากับ 185,760 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งในปัจจุบันอัตราการสูบน้ำที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาเท่ากับ 115,494 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็น 62% ของปริมาณสูบน้ำปลอดภัย

(3) พื้นที่ที่มีค่าความเหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดินสูงสุดอยู่ในบริเวณโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวนทางตะวันตกของพื้นที่ศึกษา ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย (Sandy loam) ความลึกจากผิวดินถึงระดับน้ำใต้ดิน 0–2 เมตร ระดับน้ำใต้ดินลดลง 10–20 เมตร จากปี พ.ศ. 2543–2559 ระยะห่างจากแหล่งน้ำผิวดินไม่เกิน 200 เมตร โดยอยู่ใกล้บริเวณคลอง และมีความชัน 0–2%

(4) ผลการจำลองเพิ่มบ่อเติมน้ำใต้ดินระหว่างปี พ.ศ. 2543–2559 โดยเลือกพื้นที่ตำแหน่งบ่อเติมน้ำใต้ดินอยู่ในบริเวณที่มีค่าความเหมาะสมกับโครงการเติมน้ำใต้ดิน 0.6–0.8 ลักษณะของบ่อเติมน้ำใต้ดินที่ใช้เป็นบ่อเติมน้ำใต้ดินระดับต้นความลึก 8 เมตร จำนวน 14 บ่อ อัตราการเติมน้ำใต้ดินในแต่ละบ่อเท่ากับ 200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน บ่อเติมน้ำใต้ดินระดับต้นมีลักษณะคล้ายกับบ่อสูบน้ำ โดยสามารถดัดแปลงบ่อสูบน้ำที่ไม่ใช้แล้วเป็นบ่อเติมน้ำใต้ดินได้พบว่า ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้น 0.05–0.50 เมตร โดยเพิ่มขึ้นมากที่สุดในบริเวณตำแหน่งของบ่อเติมน้ำใต้ดินซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน

(5) ผลการจำลองการเกิดอุทกภัยในพื้นที่ศึกษาโดยกำหนดให้น้ำขังบนผิวดินในพื้นที่น้ำท่วมที่ระดับน้ำเฉลี่ย 0.50 เมตร เหนือระดับผิวดิน เป็นระยะเวลา 5 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม–ธันวาคม ปี พ.ศ. 2554 พบว่า พื้นที่ที่ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นสูง 1.21–2.20 และ 2.21–3.90 เมตร อยู่ในบริเวณตะวันตกของพื้นที่ศึกษา ในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดเหตุการณ์น้ำท่วมผิวดินบางส่วนในพื้นที่ ตรงกันข้ามกับบริเวณตะวันออกของพื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ที่เกิดเหตุการณ์น้ำท่วมผิวดินทั่วทั้งพื้นที่ โดยพื้นที่ที่ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นสูงอยู่ในบริเวณที่มีความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ต่ำ ส่วนในพื้นที่ที่ระดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นต่ำอยู่ในบริเวณที่มีความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ สูง

4.2 ข้อเสนอแนะ

พารามิเตอร์ของแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินที่เลือกนำมาศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนค่อนข้างเยอะ จำเป็นต้องอาศัยการเก็บรวบรวมข้อมูลดินภาคสนามให้ครอบคลุมทั้งพื้นที่ และเพิ่มจำนวนตัวอย่างดิน เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ดินเป็นตัวแทนในพื้นที่และเป็นข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดินที่ถูกต้อง

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2551). *โครงการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำใต้ดินโดยอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาณการสูบน้ำที่เหมาะสมของชั้นน้ำใต้ดินตะกอนหินร่วน (Safe Yield) เป็นรายจังหวัด พื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีนและแม่กลอง* (รายงานฉบับสมบูรณ์). กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2554ก). *โครงการจัดทำแผนบูรณาการน้ำใต้ดินร่วมกับน้ำผิวดินทั่วประเทศ และนำร่องการจัดการทรัพยากรน้ำใต้ดินร่วมกับน้ำผิวดิน: พื้นที่ 3 ภาคกลางและภาคตะวันออก* (รายงานฉบับสมบูรณ์). กรุงเทพฯ: บริษัทวอเตอร์ รีซอร์ซ เอ็นจิเนียริง จำกัด.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2554ข). *โครงการศึกษาทดลองการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินผ่านระบบสระน้ำ พื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือตอนล่าง จังหวัดพิษณุโลก สุโขทัย และพิจิตร* (รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล และกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2562). *คู่มือเติมน้ำใต้ดินระดับต้น*. กรุงเทพฯ: สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2560). *การพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมของลุ่มน้ำแม่กลอง* (รายงานฉบับสมบูรณ์). กรุงเทพฯ: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- กิริติ ลีวัจนกุล. (2543). *อุทกวิทยา*. ปทุมธานี: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต.
- คณะอักษรศาสตร์ และศูนย์สารสนเทศทางภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2554). *รายงานผลโครงการบริการข้อมูลเพื่อการเฝ้าระวังและเตือนภัยน้ำท่วมจังหวัดนครปฐม 2554*. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม. (2562). *คู่มือปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์*. นครปฐม: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ธีระพล ตั้งสมบูรณ์. (2549). *การใช้น้ำของพืช*. กรุงเทพฯ: เอกสารประกอบการบรรยายหลักสูตรการปรับปรุงระบบการจัดการน้ำด้านเกษตรชลประทาน. กลุ่มงานวิจัยการใช้น้ำชลประทาน ส่วนการใช้น้ำชลประทาน สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ.
- บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด. (2548). *โครงการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำใต้ดินโดยอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาณการสูบน้ำที่เหมาะสมของชั้นน้ำใต้ดินตะกอนหินร่วน (Safe Yield) เป็นรายจังหวัด พื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีนและแม่กลอง* (รายงานฉบับสมบูรณ์). กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรน้ำใต้ดิน.
- ประสิทธิ์ ขุนสนิท และสุนทรี ยิ่งชัชวาลย์. (2011). *มวลชีวภาพของอ้อยพันธุ์ K95-84*. *วิทยาศาสตร์เกษตร*, 42(3), 485-493. ISSN: 0125-0369.
- สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน). (2555). *การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง: ลุ่มน้ำแม่กลอง*. กรุงเทพฯ: สสนก.

- สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). (2561). *การจัดการอ่างเก็บน้ำร่วมกับน้ำบาดาลในเขตโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่* (รายงานการวิจัยและการพัฒนาการวิจัยการเกษตร ฉบับสมบูรณ์). กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน).
- สำเร็จ ปานอุทัย, อาทร บุญเสนอ, พงศ์ธร บรรณโสภิชฐ์, โสภา ศิริไพพรรณ, พันธุ์ศักดิ์ วงศ์สูง, สุวัฒน์ จันทวงศ์, สุภาพ ปารมี, นฤมล นุชเปลี่ยน และสุกันต์ พึ่งกุล. (ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์). *การประเมินค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของป่าชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย. ส่วนวิจัยต้นน้ำ สำนักอนุรักษ์และจัดการต้นน้ำ; ส่วนวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้ สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช, กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช.*
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. FAO Irrigation and Drainage Paper No.56.
- Batelaan, O., & Smedt F.D. (2007). GIS-based recharge estimation by coupling surface–subsurface water balances. *Journal of Hydrology*, 337, 337–355.
- Bhattacharya, A.P., Jindal, S.R., & Srivastava, B. P. (1954). *Penetration of rainwater to groundwater table in western U.P., India*. U.P.I.R.I Tech. Memo No. 25.
- Chaturvedi, R.S. (1973). *A note on the investigation of ground water resources in western districts of Uttar Pradesh*. Annual Report, U.P. Irrigation Research Institute, India.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., & Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. New York: McgGraw–Hill Book Company.
- Das, M.D. (2009). *Principle of geotechnical engineering*. Stamford, CT: Cengage Learning.
- Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., & Ward, J. (2009). *Managed aquifer recharge*. Australian Government National Water Commission. Waterlines Report Series No. 13, February 2009.
- FAO. (2019). *General background*. Retrieved Aug 15, 2019 from http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706e/x6706e01.htm.
- Foxx, T. S., Tierney, G. D., & Williams, J. M. (1984). *Rooting depths of plants relative to biological and environmental factors*. Washington DC: Los Alamos National Laboratory, Publication LA–10254. U.S. Govt. Printing office 1984–0–576–034/4210.
- Global Water Partnership. (2000). *Integrated water resources management*. TAC Background Paper, No.4.
- Harbaugh, A.W., & Geological Survey. (2005). *MODFLOW–2005, the U.S. geological survey modular groundwater model: the groundwater flow process*. Reston, VA: U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey.

- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., & McDonald, M.G. (2000). *MODFLOW–2000, the U.S. geological survey modular groundwater model: user guide to modularization concepts and the groundwater flow process*. Reston, VA: U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Heath, R.C. (1983). *Basic ground-water hydrology*. Virginia: US Geological Survey.
<http://www.swap.alterra.nl/>.
<https://th.wikipedia.org/>.
- IDAHA. (2019). *Darcy's law*. Retrieved Aug 15, 2019 from
<https://www.deq.idaho.gov/media/60177882/rpa-lesson-plan-1.pdf>.
- Krishna, R. (1970). Hydrometeorological aspects of estimating ground water potential. Seminar on ground water potential in hard rock areas, Bangalore. *Geological Society of India*. 1(1): 99.1–18.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I., & Van Walsum P.E.V. (2017). *SWAP version 4: theory description and user manual*. doi_i416321_001.pdf.
- Lee, C.H., Chen, W.P., & Lee, R.H. (2006). Estimation of groundwater recharge using water balance coupled with base–flow–record estimation and stable–base–flow analysis. *Environ Geol*, 51, 73–82.
- Lerner, D.N., Issar, A.S., & Simmers, I. (1990). *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge*. International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology, v. 8, 147 p.
- Lesschen, J., Smaling, E., & Stoorvogel, J. (2004). *Scaling soil nutrient balances*. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), ISBN: 92–5–105237–9.
- Oregon Department of Transportation (ODOT). (2011). *Hydraulics Design Manual*. Oregon: Engineering and Asset Management unit Geo–Environmental Section, Highway Division, Department of Transportation (ODOT).
- Patel, P., Desai, M., & Desai, J. (2011). Geotechnical parameters impact on artificial groundwater recharging technique for urban centers. *Journal of Water Resource and Protection*, 3, 275–82.
- Ritzema, H.P. (2006). *Determining the saturated hydraulic conductivity*. Wageningen, The Netherlands: Drainage Principles and Application, ILRI Publi.
- Ruben, A., Gaines, G., & Frankenstein, S. (2015). *USCS and the USDA soil classification system*. UPRM and ERDC Educational and Research Internship Program, US Army Corps of Engineer.
- Rushton, K.R., & Ward, C. (1979). The estimation of groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 41, 345–61.

- Saghravani, S.R., Yusoff, I., Mustapha, S., & Saghravani, S.F. (2013). Estimating groundwater recharge using empirical method: a case study in the tropical zone. *Sains Malaysiana*, 42(5), 553–60.
- Sehgal, S.R. (1973). *Ground water resources of Punjab state*. Third Annual Research Session, Central Board of Irrigation and Power, New Delhi, India.
- Stebinger, J. (2014). *Examples of determinating the hydraulic conductivity of soils: theory and applications of selected basic methods*. University Handbook on Soil Hydraulics, Usti nad Labem, Czech Republic.
- UOMISAN. (2019). *Flow of water through soils*. Retrieved Aug 15, 2019 from <http://www.uomisan.edu.iq/eng/ar/admin/pdf/6407861644.pdf>.
- USDA. (1997). *Irrigation guide*. National Engineering Handbook.
- USDA. (2016). *Chapter 11 Sprinkler Irrigation*. Part 623 National Engineering Handbook.
- Utah State University. (2019). *Soil water content*. Retrieved Aug 15, 2019 from <http://www.intermountainfruit.org/orchard-irrigation/swc>.
- Vandewiele, G.L., Xu, C-Y., & Ni-Lar-Win. (1991). *Methodology for constructing monthly water balance models on basin scale, vol. VUBHydrologie 20*. Vrije Universiteit Brussel, Brussels.
- Wikipedia. (2019a). *Porosity*. Retrieved Aug 15, 2019 from <https://en.wikipedia.org/wiki/Porosity>.
- Wikipedia. (2019b). *Water content*. Retrieved Aug 15, 2019 from https://en.wikipedia.org/wiki/Water_content.
- Wu, Q., Wang, G., Zhang, W., & Cui, H. (2016). Estimation of groundwater recharge using tracers and numerical modeling in the north china plain. *Water*, 8, 353.
- Xu, C-Y. (1992). *Monthly water balance models in different climatic regions* (PhD thesis). Vrije Universiteit Brussel, 214 p.

ภาคผนวก A

การเก็บตัวอย่างดินและตรวจวัดข้อมูลจุดที่ 1 นาข้าว



ภาพผนวกที่ A-1 สภาพพื้นที่จุดเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 1 (พื้นที่นาข้าว)



ภาพผนวกที่ A-2 สภาพพื้นที่จุดเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 1 (พื้นที่นาข้าวหลังฤดูการเก็บเกี่ยว)



ภาพผนวกที่ A-3 ลักษณะดินของจุดเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 1 (พื้นที่นาข้าว)



ภาพผนวกที่ A-4 การเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 1 (พื้นที่นาข้าว) แบบคงสภาพ (Undisturbed Soil Sample) โดยอุปกรณ์กระบอกเก็บตัวอย่างดินแบบเปลือกบาง



ภาพผนวกที่ A-5 ตัวอย่างดินจุดที่ 1 (พื้นที่นาข้าว) แบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Soil Sample)



ภาพผนวกที่ A-6 ตัวอย่างดินจุดที่ 1 (พื้นที่นาข้าว) แบบคงสภาพ (Undisturbed Soil Sample)
-รูปซ้ายมือ และแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Soil Sample)-รูปขวามือ



ภาพผนวกที่ A-7 ขั้นตอนการเตรียมหน้าดินเพื่อติดตั้งถังวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer) ในดินจุดที่ 1 (พื้นที่นาข้าว)



ภาพผนวกที่ A-8 ขั้นตอนการติดตั้งถังวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer) ให้มีความลึกลงไป 15 เซนติเมตร โดยใช้ค้อนไม้ตอกด้วยแรงคน



ภาพผนวกที่ A-9 ขั้นตอนการติดตั้งเกจอ่านค่าระดับน้ำบนถังวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer)



ภาพผนวกที่ A-10 ขั้นตอนการเติมน้ำลงในถังวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer) ทั้งวงแหวนในและวงแหวนนอกที่ระดับน้ำเดียวกัน

Date : 4/11/2018
Location :
Remarks :

A Time, min (hr.)	B cm Water Level (mm)		C Cumulative time, mm.	Time
	before filling	after filling		
0		8.91	0	
15	8.91	8.00		
30	8.00	8.02		
45	8.02	8.04		
60 (1)	8.04	8.04		
90 (1.5)	8.04	8.07		
120 (2)	8.07	8.10		
180 (3)	8.10	8.16		
240 (4)				
300 (5)				
360 (6)				

ภาพผนวกที่ A-11 ขั้นตอนการจดบันทึกค่าระดับน้ำที่ลดลงบนถังวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer)

ภาคผนวก B

การเก็บตัวอย่างดินและตรวจวัดข้อมูลจุดที่ 2 พี่ชไร่



ภาพผนวกที่ B-1 สภาพพื้นที่จุดเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 2 (พื้นที่ไร่ย่อย)



ภาพผนวกที่ B-2 สภาพพื้นที่จุดเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 2 (พื้นที่ไร่ย่อย)



ภาพผนวกที่ B-3 การเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 2 (พื้นที่ไร่อ้อย) แบบคงสภาพ (Undisturbed Soil Sample) โดยอุปกรณ์กระบอกเก็บตัวอย่างดินแบบเปลือกบาง



ภาพผนวกที่ B-4 ความลึกของการเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 2 (พื้นที่ไร่อ้อย) ประมาณ 1.50 เมตร เลขเซต รากพืช



ภาพผนวกที่ B-5 การเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 2 (พื้นที่ไร่อ้อย) แบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Soil Sample)



ภาพผนวกที่ B-6 ตัวอย่างดินจุดที่ 2 (พื้นที่ไร่อ้อย) แบบคงสภาพ (Undisturbed Soil Sample)



ภาพผนวกที่ B-7 ขั้นตอนการเตรียมหน้าดินเพื่อติดตั้งถังวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer) จุดที่ 2 (พื้นที่ไร่ย่อย)



ภาพผนวกที่ B-8 ขั้นตอนการติดตั้งถึงวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer) ให้มีความลึกลงไป 15 เซนติเมตร โดยใช้ค้อนไม้ตอกด้วยแรงคน



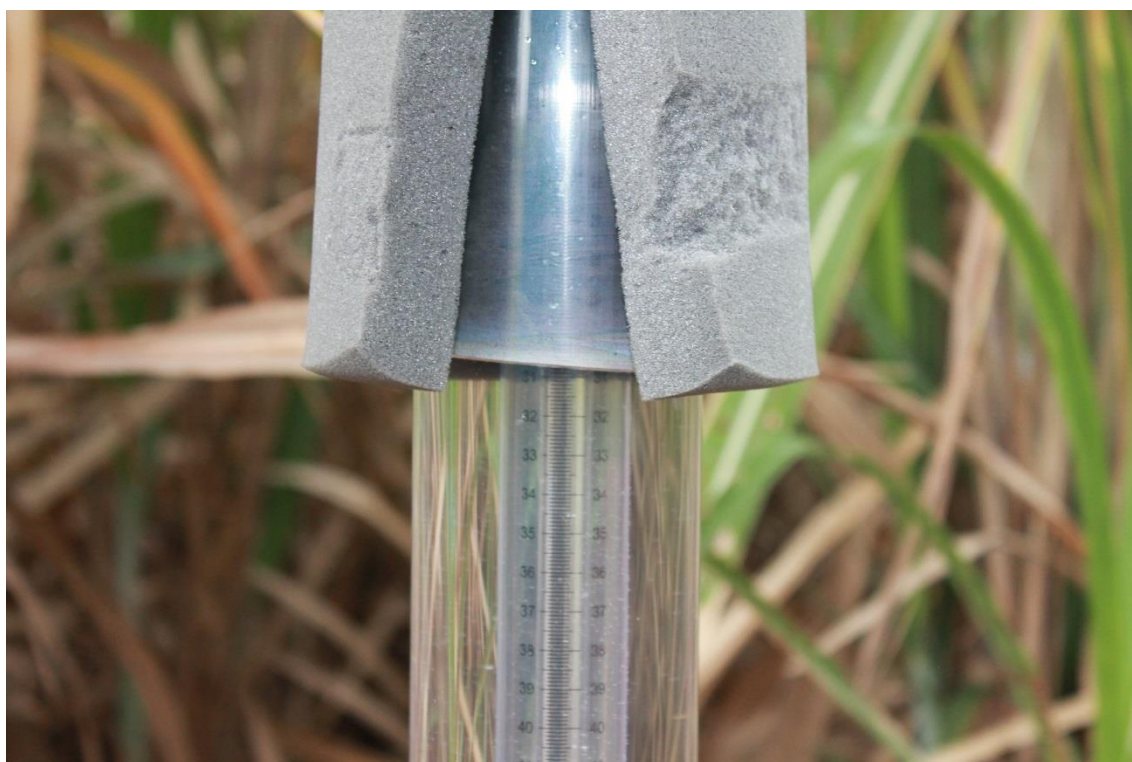
ภาพผนวกที่ B-9 ขั้นตอนการติดตั้งเกจอ่านค่าระดับน้ำและเติมน้ำลงในถังวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer)



ภาพผนวกที่ B-10 ขั้นตอนการเตรียมหน้าดินเพื่อติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดแรงดึง (Tension Infiltrometer) ในดินจุดที่ 2 (พื้นที่ไร่อ้อย)



ภาพผนวกที่ B-11 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดแรงดึงกลับ (Tension Infiltrometer) ในดินจุดที่ 2 (พื้นที่ไร่อ้อย)



ภาพผนวกที่ B-12 ขั้นตอนการอ่านค่าระดับน้ำที่ลดลงของเครื่องมือตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดแรงดึงกลับ (Tension Infiltrometer) ในดินจุดที่ 2 (พื้นที่ไร่อ้อย)

ภาคผนวก C

การเก็บตัวอย่างดินและตรวจวัดข้อมูลจุดที่ 3 พืชผักสวนครัว



ภาพผนวกที่ C-1 สภาพพื้นที่จุดเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 3 (พื้นที่ปลูกผักสวนครัว)



ภาพผนวกที่ C-2 การเก็บตัวอย่างดินจุดที่ 3 (พื้นที่ปลูกผักสวนครัว) แบบคงสภาพ (Undisturbed Soil Sample) โดยอุปกรณ์กระบอกเก็บตัวอย่างดินแบบเปลือกบาง



ภาพผนวกที่ C-3 ตัวอย่างดินจุดที่ 3 (พื้นที่ปลูกผักสวนครัว) แบบคงสภาพ (Undisturbed Soil Sample)-รูปบน และแบบเปลี่ยนแปลงสภาพ (Disturbed Soil Sample)-รูปล่าง



ภาพผนวกที่ C-4 ขั้นตอนการติดตั้งถึงวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer)



ภาพผนวกที่ C-5 ขั้นตอนการติดตั้งถังวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer) ให้มีความลึกลงไป 15 เซนติเมตร โดยใช้ค้อนไม้ต่อกด้วยแรงคน



ภาพผนวกที่ C-6 ขั้นตอนการติดตั้งเกจอ่านค่าระดับน้ำบนถังวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดวงแหวนคู่ (Double-Ring Infiltrometer)



ภาพผนวกที่ C-6 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำชนิดแรงดึงกลับ (Tension Infiltrometer) จุดที่ 3 (พื้นที่ปลูกผักสวนครัว)



ภาพผนวกที่ C-7 ขั้นตอนการจดบันทึกค่าระดับน้ำที่ลดลงของเครื่องมือตรวจวัดอัตราการซึมของน้ำ
ชนิดแรงดึงกลับ (Tension Infiltrometer) จุดที่ 3 (พื้นที่ปลูกผักสวนครัว)

ภาคผนวก D

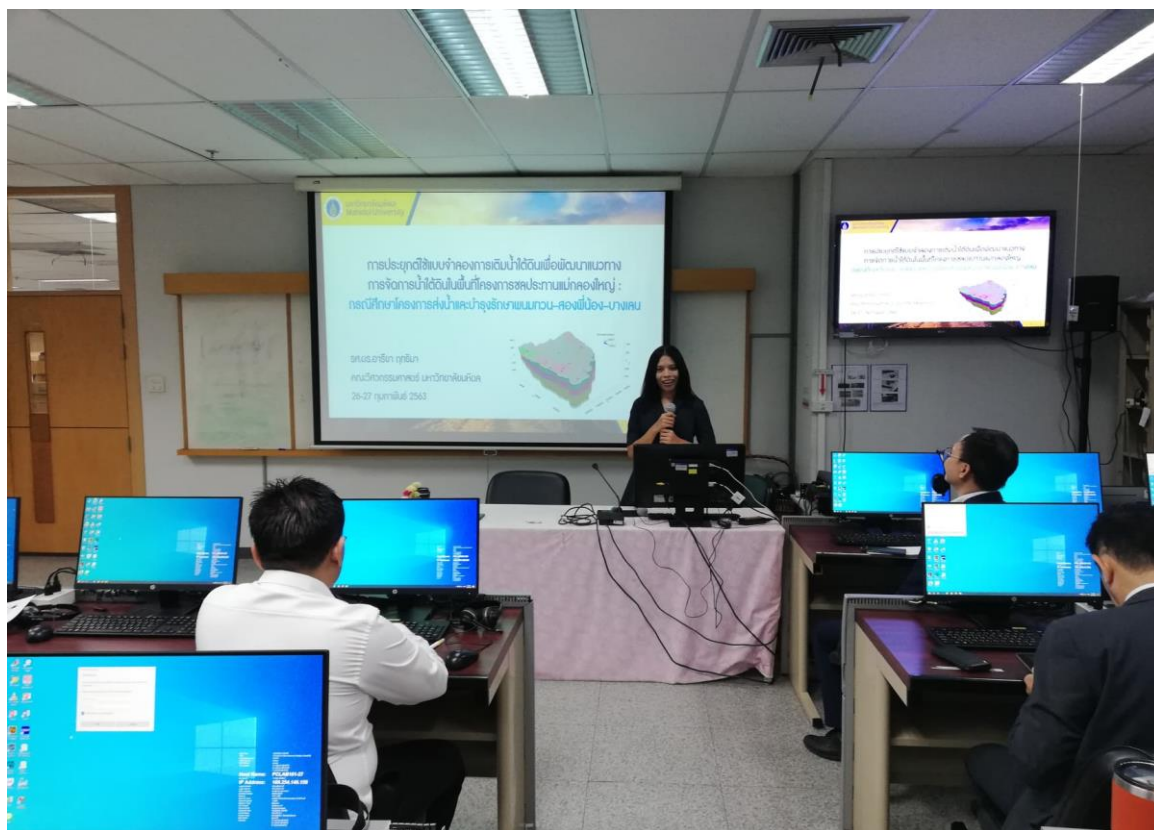
ภาพประกอบการจัดฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง “การใช้งานแบบจำลองการเติมน้ำใต้ดิน
WETSPASS-SWAP และแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน MODFLOW”
เมื่อวันที่ 26-27 กุมภาพันธ์ 2563



ภาพผนวกที่ D-1 ผู้เข้าร่วมจัดฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการถ่ายภาพร่วมกับท่านที่ปรึกษา สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และทีมวิจัย มหาวิทยาลัยมหิดล



ภาพผนวกที่ D-2 ผู้ทรงคุณวุฒิติดตามโครงการกล่าวต้อนรับ



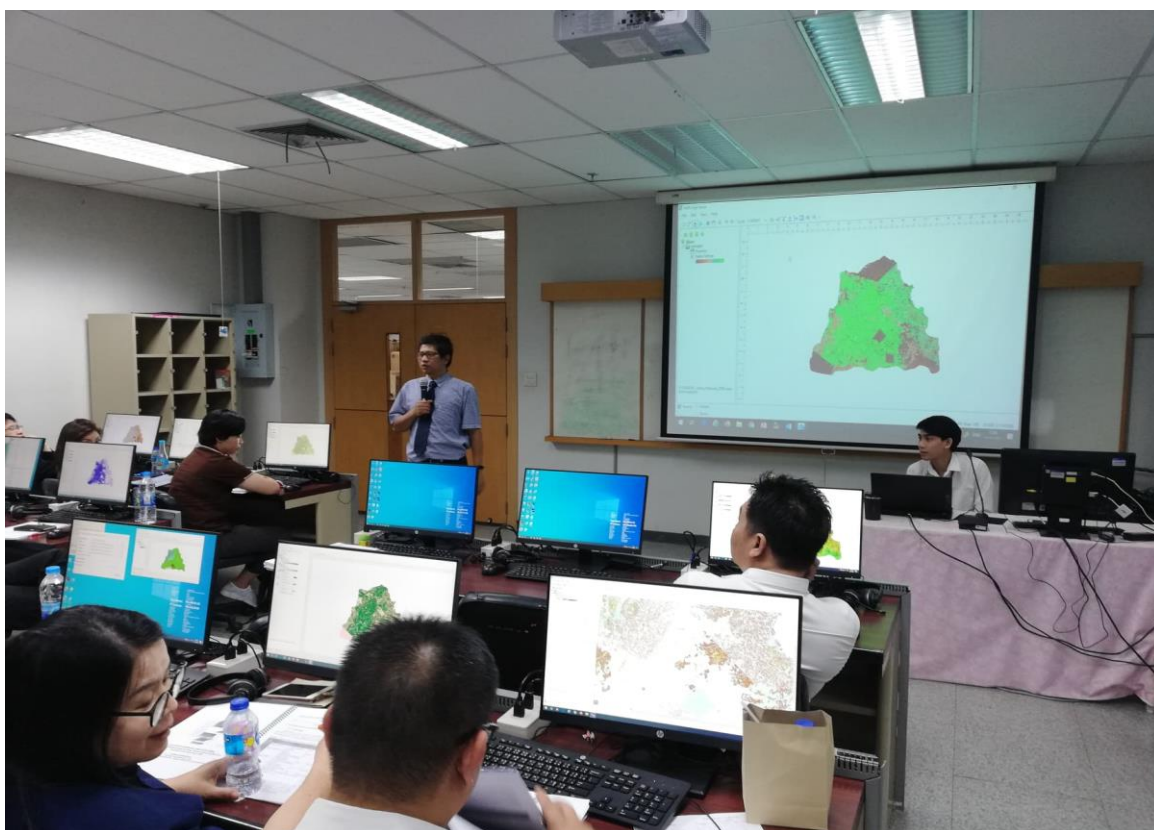
ภาพผนวกที่ D-3 หัวหน้าโครงการวิจัยนำเสนอกรอบแนวคิดงานวิจัยและผลการศึกษา



ภาพผนวกที่ D-4 ผู้ร่วมวิจัยให้การสาธิตและฝึกปฏิบัติการใช้งานแบบจำลอง



ภาพผนวกที่ D-5 บรรยายการสาธิตและฝึกปฏิบัติการใช้งานแบบจำลอง



ภาพผนวกที่ D-6 บรรยายการฝึกปฏิบัติการใช้งานแบบจำลองที่มีการแลกเปลี่ยนข้อคิดเห็น



ภาพผนวกที่ D-7 ผู้เข้าร่วมการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการจากหน่วยงานต่าง ๆ



ภาพผนวกที่ D-8 ผู้เข้าร่วมการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการจากหน่วยงานต่าง ๆ



ภาพผนวกที่ D-9 ผู้เข้าร่วมการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการจากหน่วยงานต่าง ๆ