

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย โดยแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า-น้ำบาดาล
และการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร

นายจිරพงษ์ เหล่าน้ำใส



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ASSESSMENT OF GROUNDWATER POTENTIAL IN SUKHOTHAI PROVINCE
USING RAINFALL - RUNOFF - GROUNDWATER MODELING AND
ISOTOPES FINGERPRINTING TECHNIQUE

Mr. Jeerapong Laonamsai



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Water Resources Engineering
Department of Water Resources Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2016
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย โดย
แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า-น้ำบาดาล และการวิเคราะห์
องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร

โดย

นายจิรพงษ์ เหล่าน้ำใส

สาขาวิชา

วิศวกรรมแหล่งน้ำ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักษรา พงษ์ธิวิทยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักษรา พงษ์ธิวิทยา)

..... กรรมการ
(ดร.สุภัทรา วิเศษศรี)

..... กรรมการ
(ดร.ปิยธิดา ห้อยสังวาลย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อรุณญา เฟื่องสวัสดิ์)

จිරพงษ์ เหล่าน้ำใส : การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย โดยแบบจำลอง น้ำฝน-น้ำท่า-น้ำบาดาล และการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร (ASSESSMENT OF GROUNDWATER POTENTIAL IN SUKHOTHAI PROVINCE USING RAINFALL - RUNOFF - GROUNDWATER MODELING AND ISOTOPES FINGERPRINTING TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.อักษรา พงุทธิวิทยา, 245 หน้า.

การใช้น้ำบาดาลในระดับตื้นในปริมาณมาก เป็นสาเหตุทำให้เกิดการลดระดับลงของน้ำบาดาลในระดับตื้น โดยเฉพาะในจังหวัดสุโขทัย เกษตรกรในพื้นที่ปลูกข้าวเฉลี่ยปีละ 3 ครั้ง ส่งผลให้ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำตื้นลดต่ำลง จนไม่สามารถสูบน้ำบาดาลโดยใช้เครื่องสูบน้ำหยดขังได้ เนื่องจากระดับน้ำมีความลึกมากกว่าความสามารถในการดูดของปั๊ม ทำให้เกษตรกรต้องทรุดปากบ่อน้ำบาดาลลง และเกิดอุบัติเหตุเสียชีวิตระหว่างการทรุดบ่อน้ำบาดาลเป็นจำนวนมาก

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาความเชื่อมโยงทางศาสตร์ระหว่างน้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล ในพื้นที่ศึกษา จากองค์ประกอบไอโซโทปเสถียร การศึกษาได้เก็บตัวอย่างน้ำจากพื้นที่ศึกษา 45 ตัวอย่าง เพื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองพบว่า น้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย มีแหล่งกำเนิดมาจาก น้ำฝนร้อยละ 69.33 และน้ำในแม่น้ำยมร้อยละ 30.67 อีกทั้งยังได้ศึกษาสัดส่วนน้ำผิวดินที่ซึมลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น โดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง น้ำฝน-น้ำท่า ArcSWAT พบว่า อัตราการเติมน้ำบาดาลเฉลี่ย 882.05 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือ ร้อยละ 11.06 ของปริมาณน้ำฝน ข้อมูลจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้า ในแบบจำลองน้ำบาดาล MODFLOW เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของน้ำบาดาล และประเมินศักยภาพน้ำบาดาล จากปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในระดับตื้นโดยธรรมชาติ ผลจากแบบจำลองพบว่า ปริมาณการสูบน้ำบาดาลระดับตื้น ควรสูบน้ำไม่เกิน 287.386 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เพื่อรักษาสสมดุลของชั้นน้ำบาดาล ทั้งนี้ปัญหาการลดระดับของน้ำบาดาลระดับตื้น ยังเป็นผลจากอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลที่กระจุกตัวหนาแน่นในพื้นที่ ดังนั้นการแก้ไขปัญหาการลดระดับของน้ำบาดาลระดับตื้น ควรคำนึงระยะห่างระหว่างบ่อน้ำบาดาลที่มีการสูบน้ำด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5770140721 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS: GROUNDWATER RECHARGE / SURFACE WATER-GROUNDWATER INTERACTION / SWAT MODEL / GMS-MODFLOW

JEERAPONG LAONAMSAI: ASSESSMENT OF GROUNDWATER POTENTIAL IN SUKHOTHAI PROVINCE USING RAINFALL - RUNOFF - GROUNDWATER MODELING AND ISOTOPES FINGERPRINTING TECHNIQUE. ADVISOR: ASST. PROF. AKSARA PUTTHIVIDHYA, Ph.D., 245 pp.

Thailand's changing climate patterns has led to instability and challenges to the people and the nation's economy. Groundwater is an increasingly important resource to human populations in Thailand as it has been served as the secondary source of drinking and agricultural water in drought-hit provinces in the majority of Chao Phraya river basin. The massive usage of groundwater is the major cause of the declining of the shallow groundwater elevation worldwide, especially in Sukhothai province of Thailand where local farmers usually have their rice farming at least 3 times a year. Drought caused by irregular rainfall has become a significant issue in Thailand in the most recent years. Long periods of droughts are impacting rice and other cash crops production. Water scarcity is a global threat that is estimated to hit Thailand hard and the country is in need to develop a long-term plan to deal with these challenges. Effective water management needs to be practiced and conjunctive use of surface water and groundwater is being implemented.

This thesis therefore aims to comprehensively understand movement and distribution processes within the hydrological systems for a sustainable resource development without adverse effects on the environment, and isotope techniques are effective tools for fulfilling critical hydrogeological information needs. Forty five water samples from the study area were collected and further analyzed in the laboratory using isotope mass spectrometer. The results indicated that the origin of the groundwater in Sukhothai was composed of 69.33% rainfall and 30.67% of Yom river water. Additionally, SWAT model was employed for spatio-temporal surface water simulation and the estimation of groundwater recharge rates. Sensitivity analysis, calibration, validation, and uncertainty analysis were performed by SWAT-CUP software. Due to the semi-distributed features of SWAT and the difficulty of calculating groundwater distributed parameters, recharge values estimated by SWAT were used in a MODFLOW model for groundwater simulation at steady and unsteady states. Surface water and groundwater potentials in Sukhothai province of Thailand were estimated based on aquifer hydrodynamic coefficients from calibrated and validated modeling results. SWAT and MODFLOW models were successfully tested and the results of the combination of the two models were found acceptable. SWAT simulation results revealed the annual average groundwater recharge rate of 882 MCM per year or accounted for 11.06% of the total rainfall in the study area. The data from rainfall-runoff model were utilized as input data for groundwater flow model (i.e., MODFLOW) for the study the flow characteristics and assess the groundwater potential from natural recharging process into the shallow aquifer. The results indicated that the groundwater yield of 287 MCM per year is available in the study area.

Department: Water Resources Engineering

Student's Signature

Field of Study: Water Resources Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

ผศ. ดร. อักษรา พฤทธิวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ช่วยแก้ปัญหา ช่วยเหลือในการวางแผนงาน และสร้างแนวทางในการศึกษาวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมา โดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จ รศ.ดร. ทวนทัน กิจไพศาลกุล ประธานการสอบ และกรุณาให้คำแนะนำช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ คอยสอบถามความก้าวหน้าวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ปิยธิดา เรืองรัมย์ อาจารย์ ดร. สุภัทรา วิเศษศรี กรรมการสอบ ที่ให้คำแนะนำ และคอยสอบถามความก้าวหน้าวิทยานิพนธ์ และ ดร. อรัญญา เฟื่องสวัสดิ์ กรรมการสอบภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ อนึ่ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ไม่ได้ ถ้าขาดข้อมูลที่ ดี และคำแนะนำที่ดี ขอขอบคุณกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ศูนย์วิจัยน้ำบาดาล (มหาวิทยาลัยขอนแก่น) สถาบันสารสนเทศน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล และห้องปฏิบัติการ สำหรับค่าใช้จ่ายในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้รับการสนับสนุนจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช อุดหนุนการดำเนินการวิจัยจนแล้วเสร็จ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ ผู้วิจัยตลอดมา ตลอดจนญาติ พี่น้อง เพื่อนฝูง ที่ให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนสำเร็จ การศึกษาเป็นมหาบัณฑิตได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มา ความสำคัญ และความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 พื้นที่ศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการศึกษาที่ผ่านมา.....	8
2.1 น้ำบาดาล (Groundwater)	8
2.2 การไหลของน้ำบาดาล (Groundwater Flow).....	9
2.3 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล	10
2.4 อุทกวิทยาไอโซโทป (Isotope Hydrology).....	11
2.5 แบบจำลอง ArcSWAT.....	18
2.6 วิธีวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลอง	26
2.7 แบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล (Groundwater Flow Model).....	29
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	39
3.1 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา.....	39
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	50

3.3	วิธีการศึกษา.....	53
3.4	ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	64
บทที่ 4	การวิเคราะห์หองค์ประกอบไอโซโทปเสถียร	66
4.1	ผลการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร	66
4.2	การวิเคราะห์ตัวอย่างองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำ	70
4.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝน.....	71
4.4	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดิน.....	78
4.5	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำบาดาล	84
4.6	การวิเคราะห์สมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทป (Isotopes Mass Balance Analysis).....	85
บทที่ 5	การสร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า	92
5.1	ข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง	92
5.2	การนำเข้าข้อมูลในแบบจำลองน้ำฝน – น้ำท่า (ArcSWAT).....	99
5.3	การเปรียบเทียบแบบจำลองน้ำฝน – น้ำท่า (ArcSWAT)	100
5.4	ผลการคำนวณและวิเคราะห์ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น (Groundwater Recharge).....	107
5.5	ผลการวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow).....	111
บทที่ 6	การสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล	129
6.1	การศึกษาลักษณะทางกายภาพแอ่งน้ำบาดาลด้วยแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model).....	129
6.2	การปรับเทียบและสอบทานแบบจำลอง (Model Calibration and Validation).....	135
6.3	ทิศทางการไหลของน้ำบาดาล	141
6.4	การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล	144
บทที่ 7	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	148
7.1	สรุปผลการวิจัย.....	148

7.2 ข้อเสนอแนะ	154
รายการอ้างอิง	155
ภาคผนวก ก	160
ภาคผนวก ข	163
ภาคผนวก ค	172
ภาคผนวก ง	174
ภาคผนวก จ	184
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	245



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การแปลความหมายค่า NSE	28
2-2 ชุดคำสั่งการคำนวณภายในแบบจำลอง MODFLOW และข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ	31
3-1 การใช้ที่ดินในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย	41
3-2 ปริมาณการใช้น้ำในจังหวัดสุโขทัย	49
3-3 ชุดข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง ArcSWAT	64
3-4 ชุดข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง MODFLOW	65
3-5 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ห่อทกวิทยาไอโซโทป	65
4-1 ปริมาณฝน ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝนในพื้นที่ จังหวัดสุโขทัย	71
4-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน ช่วงฤดูแล้ง จังหวัดสุโขทัย	71
4-3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน ช่วงฤดูฝน จังหวัดสุโขทัย	72
4-4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล จังหวัด สุโขทัย ปี พ.ศ. 2559	86
4-5 ค่าองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำฝน น้ำท่า น้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2559 จังหวัดสุโขทัย	88
5-1 ข้อมูลและที่มาของข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง ArcSWAT	92
5-2 ผลการศึกษาความอ่อนไหวของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ArcSWAT	101
5-3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับแก้อัตโนมัติ	102
5-4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองน้ำฝน – น้ำท่า (ArcSWAT) โดยวิธี Manual Calibration	104
5-5 ผลการปรับเทียบแบบจำลองสำหรับปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานี Y.31	105
5-6 ผลการปรับเทียบแบบจำลองสำหรับปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานี Y.14	106

ตารางที่	หน้า
5-7 ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น พื้นที่จังหวัดสุโขทัย	109
5-8 ชุดโปรแกรมสมการ Recurve Regression Aanalysis เพื่อใช้วิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน.....	115
5-9 ค่าดัชนีการไหลพื้นฐาน (Baseflow Index, BFI).....	122
5-10 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำใต้ดิน	123
6-1 คุณสมบัติทางอุทกธรณีวิทยาของชั้นน้ำบาดาล	132
6-2 การใช้น้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย.....	132
6-3 ผลการศึกษาความสมดุลของระบบน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัยในสถานะจริง ปี พ.ศ. 2543-2556.....	146
6-4 ผลการศึกษาความสมดุลของระบบน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัยในสถานะกำหนดเงื่อนไข ปี พ.ศ. 2543-2556.....	147
7-1 การเปรียบเทียบผลการศึกษาปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล.....	150

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1-1 ลักษณะทางกายภาพกลุ่มน้ำยม	5
1-2 พื้นที่จังหวัดสุโขทัย	6
2-1 ชั้นน้ำบาดาล.....	9
2-2 ลักษณะไอโซโทปของน้ำในวงจรรุทกวิทยา	12
2-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deuterium และ O-18	14
2-4 เส้นน้ำบรรยากาศ (Meteoric Water Line).....	15
2-5 สถานีอุตุนิยมเครือข่ายติดตามวิเคราะห์ส่วนประกอบไอโซโทปในน้ำฝน.....	17
2-6 การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร	18
3-1 ตำแหน่งบ่อน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย	42
3-2 ศักยภาพน้ำบาดาลของจังหวัดสุโขทัย	48
3-3 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	52
3-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\delta^{18}\text{O}$ และ δD	53
3-5 แผนผังการวิเคราะห์เทคนิคไอโซโทปเสถียร	56
3-6 แผนผังการสร้างแบบจำลอง SWAT.....	58
3-7 แบบจำลองน้ำบาดาลเชิงโมโนทัศนีย์	60
3-8 แผนผังการสร้างแบบจำลอง MODFLOW.....	63
4-1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรในจังหวัดสุโขทัย	66
4-2 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำฝนเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร	67
4-3 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำผิวดินเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร	68
4-4 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร.....	69
4-5 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำ.....	70

รูปที่	หน้า
4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ น้ำฝน สถานีสุโขทัย ปี พ.ศ. 2556-2558.....	73
4-7 การเปรียบเทียบเส้น Local Meteoric Water Line (LMWL)	73
4-8 กราฟ δD และ $\delta^{18}O$ น้ำฝน รายสัปดาห์ สถานีสุโขทัย ปี พ.ศ. 2556.....	74
4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ ในน้ำฝน จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2556	75
4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ ในน้ำฝน จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2557	76
4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ ในน้ำฝน จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2558	77
4-12 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดิน และ LMWL พื้นที่สุโขทัย.....	79
4-13 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำในแม่น้ำสายหลัก และ LMWL พื้นที่สุโขทัย	80
4-14 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดินในแม่น้ำยม จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2556	81
4-15 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดินในแม่น้ำยม จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2557	82
4-16 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดินในแม่น้ำยม จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2558	83
4-17 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำบาดาล และ LMWL พื้นที่สุโขทัย	84
4-18 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียร ณ อำเภอศรีสัชชนาลัย จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2559	86
4-19 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียร ณ อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2559.....	87
4-20 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียร จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2555.....	89
4-21 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียร จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2551.....	90
4-22 สรุปผลการศึกษารายการประกอบไอโซโทปเสถียร	91
5-1 แผนที่ระดับชั้นความสูงของพื้นที่	94
5-2 แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน.....	95
5-3 แผนที่จุดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำยม	96
5-4 สถานีฝนรายวัน	97
5-5 สถานีตรวจวัดน้ำท่า	98
5-6 การนำเข้าข้อมูลแบบจำลอง ArcSWAT	99

รูปที่	หน้า
5-7 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่า ณ สถานี Y.31 อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา.....	103
5-8 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่า ณ สถานี Y.14 อำเภอศรีสขณาสัย จังหวัดสุโขทัย.....	103
5-9 ผลการปรับเทียบค่าปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.31.....	105
5-10 ผลการปรับเทียบค่าปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.14.....	106
5-11 องค์ประกอบทางอุทกวิทยาที่แบบจำลอง ArcSWAT คำนวณได้.....	107
5-12 แบบจำลอง ArcSWAT เชิงมโนทัศน์	108
5-13 ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นรายเดือน จังหวัดสุโขทัย.....	110
5-14 ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นรายปี จังหวัดสุโขทัย.....	111
5-15 กราฟปริมาณน้ำท่าและปริมาณการไหลพื้นฐาน ณ สถานี Y.14 อ. ศรีสขณาสัย จ. สุโขทัย	112
5-16 กราฟปริมาณน้ำท่าและปริมาณการไหลพื้นฐาน ณ สถานี Y.4 อ. เมือง จ. สุโขทัย.....	112
5-17 ที่ตั้งสถานีวัดน้ำท่าเพื่อพิจารณาการไหลพื้นฐาน	114
5-18 ปริมาณการไหลพื้นฐานในแต่ละสถานี	121
5-19 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการไหลพื้นฐาน	127
6-1 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์แอ่งน้ำบาดาลจังหวัดสุโขทัย	130
6-2 หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยาพื้นที่จังหวัดสุโขทัย	131
6-3 บ่อน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย.....	133
6-4 ขอบเขตแบบจำลอง	134
6-5 การกำหนดขอบเขตแบบจำลองน้ำบาดาล (GMS-MODFLOW).....	135
6-6 ผลการจำลองน้ำบาดาล จังหวัดสุโขทัย	136
6-7 เปรียบเทียบระดับน้ำบาดาลที่วัดได้ในสนามกับค่าที่คำนวณจากแบบจำลอง (พ.ศ.2555-2558)	140
6-8 ผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำบาดาล ในชั้นน้ำเจ้าพระยา (Qfd)	141
6-9 ผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำบาดาล ในชั้นน้ำเชียงราย (Qlt).....	142
6-10 ผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำบาดาล ในชั้นน้ำเชียงใหม่ (Qht)	143

รูปที่	หน้า
6-11 การจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของระบบน้ำบาดาล	144
6-12 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลเข้า-ออก ของระบบน้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2543-2556	145
6-13 ผลต่างของปริมาณน้ำเข้า-ออก ระบบน้ำบาดาล จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2543-2556.....	145
6-14 ผลการจำลองระดับน้ำบาดาล	146
7-1 สัดส่วนของน้ำในแม่น้ำยมจังหวัดสุโขทัย.....	149
7-2 สัดส่วนของน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย.....	150
7-3 สรุปผลการศึกษา.....	154



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา ความสำคัญ และความเป็นมาของงานวิจัย

ในยุคปัจจุบันที่อารยประเทศมุ่งเน้นการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของตน ตามความเจริญเติบโตของเศรษฐกิจโลก หนึ่งในที่กล่าวมานั้นคือ ประเทศไทย ซึ่งถือว่าเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา ดังจะเห็นได้จากการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตสินค้าต่างๆ ให้สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดทั้งภายในและต่างประเทศได้ นำไปสู่การนำทรัพยากรมาใช้ในกระบวนการผลิตมากขึ้นเช่นกัน น้ำเป็นหนึ่งในทรัพยากรธรรมชาติที่มีค่าและมีอยู่อย่างจำกัด การบริหารจัดการน้ำจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้เกิดแนวทางการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และเกิดประสิทธิผลมากที่สุด

ในประเทศไทย คณะกรรมการอุทกวิทยาแห่งชาติ ได้แบ่งพื้นที่ประเทศไทยออกเป็นลุ่มน้ำผิวดิน 25 ลุ่มน้ำ ประกอบด้วย 254 ลุ่มน้ำย่อย มีพื้นที่ลุ่มน้ำผิวดินรวมทั้งประเทศ 511,361 ตารางกิโลเมตร สำหรับน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ได้แบ่งแอ่งน้ำบาดาลในประเทศไทยออกเป็น 27 แอ่งน้ำบาดาล แต่ละแอ่งจะมีสภาพทางอุทกธรณีที่แตกต่างกันทั้งเป็นที่ราบหรือแนวภูเขา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการศึกษาและจัดการทรัพยากรน้ำได้ชัดเจนขึ้น ในปัจจุบัน ประเทศไทยยังคงประสบปัญหาทั้งอุทกภัย ดังที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2554 และปัญหาภัยแล้งในปี พ.ศ. 2558-2559 โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ เนื่องจากมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการอุปโภคบริโภคและสำหรับการเกษตร อันเนื่องมาจากการขาดแคลนแหล่งน้ำผิวดินจากการกักเก็บน้ำสำรองไม่เพียงพอ และปัญหาฝนทิ้งช่วงเป็นเวลานานในฤดูแล้ง

จังหวัดสุโขทัยซึ่งตั้งอยู่ทางภาคเหนือของไทย มีภูมิประเทศเป็นภูเขาสูงตลอดทางตอนเหนือของพื้นที่ และเป็นที่ยึดลุ่มน้ำท่วมถึงในตอนกลางและตะวันออกเฉียงเหนือของพื้นที่ จัดเป็นหนึ่งในจังหวัดที่ประสบปัญหาอุทกภัยบ่อยครั้ง เนื่องจากสุโขทัยมีแม่น้ำยมไหลผ่าน โดยมีลักษณะของแม่น้ำมีลักษณะเป็นคอคอด ยากต่อการระบายน้ำในช่วงน้ำหลาก ประกอบกับไม่มีเขื่อนกักเก็บน้ำในลุ่มน้ำยม ทำให้เกิดปัญหาอุทกภัยในฤดูน้ำหลากทุกๆปี ขณะเดียวกันในช่วงฤดูแล้งจังหวัดสุโขทัยยังประสบกับปัญหาภัยแล้ง เนื่องจากฝนทิ้งช่วงเป็นเวลานาน อีกทั้งแหล่งกักเก็บปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่ ไม่สามารถกักตุนน้ำให้เพียงพอต่อความต้องการในฤดูแล้งได้ ทำให้ประชากรในพื้นที่หันมาใช้น้ำบาดาลในปริมาณมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายๆ ปีที่ผ่านมา ส่งผลให้เกิดการลดระดับของน้ำบาดาลในระดับดินอย่างรวดเร็วและระดับน้ำบาดาลไม่คืนตัวกลับสู่ระดับน้ำบาดาลเดิม

ปัญหาการลดระดับของน้ำบาดาลในระดับต้นลงอย่างรวดเร็ว และมีการลดระดับลงเป็นบริเวณกว้างในจังหวัดสุโขทัยนั้นเป็นปัญหาสำคัญ จากการศึกษาโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาลพบว่า ข้อมูลระดับน้ำบาดาลเดิมของจังหวัดสุโขทัยอยู่ที่ประมาณ 1 เมตรจากระดับผิวดิน แต่ในปัจจุบันระดับน้ำบาดาลได้ลดลงไปอยู่ที่ประมาณ 15 เมตรจากระดับผิวดิน ส่งผลให้ไม่สามารถสูบน้ำบาดาลจากที่เคยใช้เครื่องสูบน้ำหยดขังขึ้นมาใช้ได้ตามปกติ เกษตรกรในพื้นที่ต้องทำการทดบ่อ โดยการลดระดับปากบ่อให้ลึกลงเพื่อทำการติดตั้งเครื่องสูบน้ำหยดขัง เพื่อสูบน้ำขึ้นมาใช้ ปัญหาการลดระดับลงของชั้นน้ำบาดาลในระดับต้นในพื้นที่จังหวัดสุโขทัยนั้น นับวันจะทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากปัจจุบันราคาพืชผลทางการเกษตรมีราคาสูงขึ้นมาก จึงมีการเจาะบ่อน้ำบาดาลในระดับต้นเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เพื่อสูบน้ำบาดาลมาใช้เพื่อการเกษตรที่ขยายตัวเพิ่มมากขึ้น โดยมีการใช้น้ำบาดาลในระดับต้นเพื่อการปลูกข้าวถึงปีละ 3 ครั้ง การใช้น้ำบาดาลระดับต้นในปริมาณที่มากเกินไปจนสมดุลติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เกิดการลดระดับลงของน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่อง และระดับน้ำบาดาลเสียสมดุลโดยไม่กลับคืนสู่สภาวะปกติในเวลาอันใกล้

การหาแนวทางแก้ไขปัญหาการลดระดับลงของน้ำบาดาลในระดับต้น ได้มีการศึกษาทดลองเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล เพื่อหาความสัมพันธ์ของอัตราการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล และเป็นแนวทางแก้ไขปัญหาการลดระดับลงของชั้นน้ำบาดาล ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น และยังสามารถแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำโดยการระบายน้ำผิวดินในช่วงฤดูน้ำหลากลงสู่ชั้นน้ำบาดาล และนำกลับขึ้นมาใช้ในช่วงฤดูแล้ง จากกระบวนการข้างต้น กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ซึ่งเป็นหน่วยงานที่สนับสนุนข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้ ได้จัดทำโครงการศึกษาทดลองการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินผ่านระบบสระน้ำ (Ponding System) หรือระบบอื่นๆ ที่เหมาะสม ซึ่งต้องใช้ความรู้ความเข้าใจความสัมพันธ์เชิงพฤติกรรมระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดินพื้นที่ และปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่เพื่อใช้ในการกำหนดปริมาณการใช้ทรัพยากร เพื่อให้เกิดการบริหารจัดการระหว่างน้ำผิวดินและน้ำบาดาลอย่างบูรณาการ

การบริหารจัดการน้ำให้มีความยั่งยืนนั้น ต้องอาศัยการบริหารจัดการน้ำทั้งจากบนดินและใต้ดิน ร่วมกันให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด การบริหารจัดการแหล่งน้ำบาดาลจะเกิดประสิทธิภาพที่ดีได้นั้น ต้องมีความรู้ความเข้าใจที่มาก และพฤติกรรมของน้ำบาดาลเป็นอย่างดี โดยในการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นศึกษาการจัดการน้ำบาดาล ซึ่งมีบทบาทมากขึ้นในปัจจุบัน เพื่อรองรับการใช้น้ำที่มีอยู่ เช่น การใช้น้ำภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม เป็นต้น โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีไฮโดรโพลีเมียร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้วิเคราะห์พฤติกรรมของน้ำบาดาลได้ดีขึ้น รวมถึงการใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อให้เข้าใจถึงความต่อเนื่องระหว่าง น้ำบาดาลและน้ำผิวดิน หรือการไหลพื้นฐาน (Baseflow) และสอบเทียบผลที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองข้างต้น เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของน้ำบาดาลได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งประยุกต์ใช้

แบบจำลอง MODFLOW หาปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่ เพื่อประเมินศักยภาพของน้ำบาดาล และกำหนดรูปแบบการใช้ทรัพยากรให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาความเชื่อมโยงทางชลศาสตร์ระหว่างน้ำบาดาลระดับตื้นและน้ำผิวดินในพื้นที่ศึกษา
2. สร้างแบบจำลองประเมินปริมาณน้ำผิวดิน สัดส่วนน้ำผิวดินที่เติมลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น และปริมาณ Baseflow ที่เติมลงสู่ระบบลำน้ำในพื้นที่ศึกษา
3. สร้างแบบจำลองควบน้ำผิวดิน-น้ำบาดาล จำลองระดับน้ำ และลักษณะการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา
4. ประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาความเชื่อมโยงเชิงชลศาสตร์ระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดินจากองค์ประกอบของไฮโดรโทปเสถียรของน้ำจากแหล่งต่างๆ อาทิ น้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล โดยใช้ชุดข้อมูลปี 2551 2555 และ 2559 ที่เก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย
2. ศึกษาปริมาณน้ำผิวดิน สัดส่วนน้ำผิวดินที่เติมลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น และปริมาณ Baseflow ที่เติมลงสู่ระบบแม่น้ำ โดยใช้แบบจำลอง SWAT ในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำยม โดยใช้สถานีวัดปริมาณน้ำท่าที่สถานี Y.31 และ Y.14 เพื่อเปรียบเทียบและสอบทานแบบจำลอง
3. สร้างแบบจำลองควบน้ำผิวดิน-น้ำบาดาล เพื่อจำลองระดับและลักษณะการไหล โดยใช้แบบจำลอง MODFLOW ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย
4. ประเมินศักยภาพน้ำบาดาลจากปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

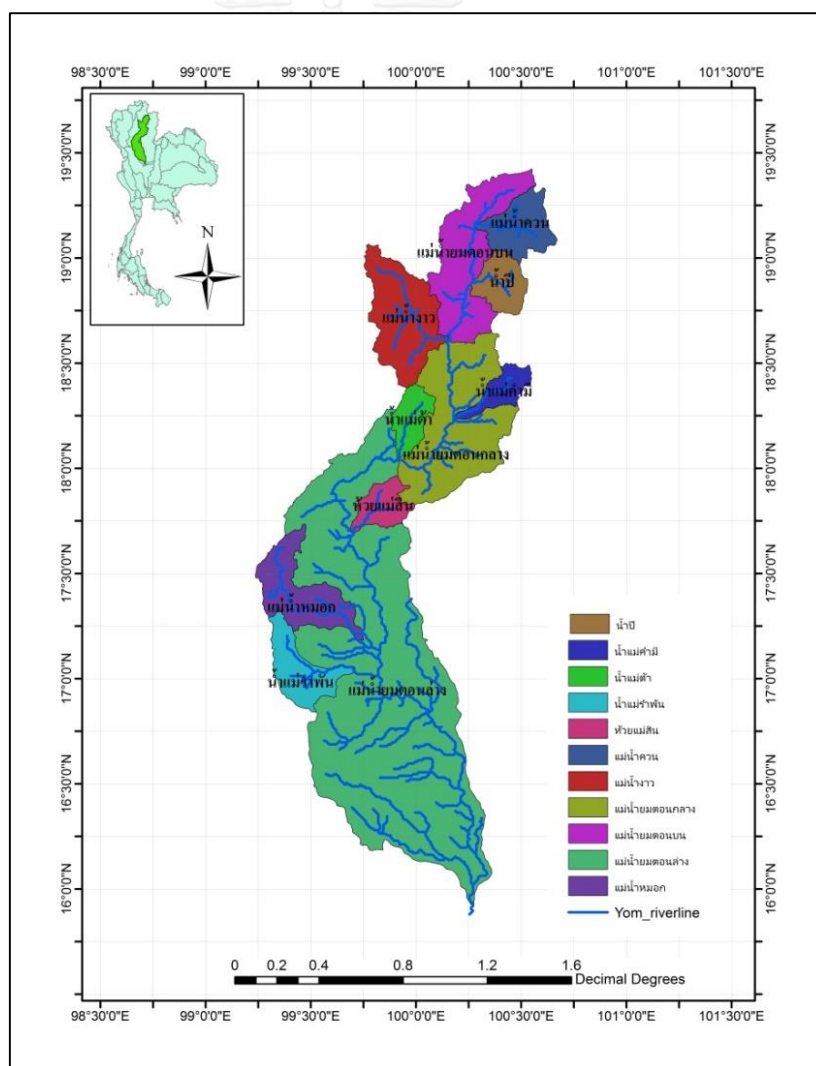
1.4 พื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ได้สร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า โดยเลือกกลุ่มน้ำยมเป็นพื้นที่ศึกษา กลุ่มน้ำยมตั้งอยู่ทางตอนเหนือของประเทศไทย ลักษณะกลุ่มน้ำวางตัวตามแนวเหนือ-ใต้ มีพื้นที่กลุ่มน้ำรวมทั้งสิ้น 24,046.89 ตารางกิโลเมตร ตำแหน่งที่ตั้งของกลุ่มน้ำอยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 14°50' เหนือ ถึงเส้นรุ้งที่ 18°25' เหนือ และระหว่างเส้นแวงที่ 99°16' ตะวันออก ถึงเส้นแวงที่ 100°40' ตะวันออก มีอาณาเขตติดต่อกับกลุ่มน้ำหลักอื่นๆ 4 กลุ่มน้ำ คือ ทิศเหนือติดกับกลุ่มน้ำโขง ทิศใต้ติดกับกลุ่มน้ำปิง ทิศตะวันตกติดกับกลุ่มน้ำวังและกลุ่มน้ำปิง และทิศตะวันออกติดกับกลุ่มน้ำน่าน ครอบคลุมเขตการปกครอง 11 จังหวัด ได้แก่ พะเยา น่าน ลำปาง แพร่ ตาก กำแพงเพชร สุโขทัย พิษณุโลก อุตรดิตถ์ พิจิตร และนครสวรรค์ โดยจังหวัดที่มีพื้นที่เกือบทั้งหมดอยู่ในกลุ่มน้ำยมมี 2 จังหวัด คือ แพร่ และสุโขทัย

แม่น้ำยมมีต้นกำเนิดจากตอยขุนยวมในทิวเขาผีปันน้ำ อยู่ในเขตอำเภอปงและอำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา ไหลผ่านหุบเขาที่มีความลาดชันมากโดยมีความลาดชันลำน้ำ ประมาณ 1:700 และมีระดับความสูงที่ 180-360 เมตร รทก. มีที่ราบแคบๆ ริมแม่น้ำเป็นบางตอนก่อนไหลเข้าสู่เขตจังหวัดแพร่ จากนั้นจะไหลออกสู่ที่ราบผืนใหญ่ ผ่านอำเภอสอง อำเภอสูงเม่น อำเภอเด่นชัย จากนั้นจะไหลเข้าหุบเขาทางทิศตะวันตก ผ่านอำเภอลอง อำเภอวังชิ้น แล้วไหลลงทางใต้เข้าสู่ที่ราบที่อำเภอศรีสัชชาลัย จังหวัดสุโขทัย ในช่วงนี้แม่น้ำยมจะไหลคู้ขนานมากับแม่น้ำน่าน และเริ่มมีความลาดชันลดลงโดยมีความลาดชันลำน้ำ ประมาณ 1:2,300 ระดับความสูงของพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำอยู่ที่ระดับ 50-180 เมตร รทก. จากนั้นจะไหลผ่านอำเภอสวรรคโลก อำเภอศรีสำโรง อำเภอกงไกรลาศ และไหลผ่านอำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก เข้าสู่อำเภอสางงาม จังหวัดพิจิตร ผ่านอำเภอโพทะเล จนเข้าเขตจังหวัดนครสวรรค์ แล้วไหลมาบรรจบกับแม่น้ำน่าน ที่บ้านเกษชัย อำเภอชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์ โดยมีความลาดชันลำน้ำต่ำ ประมาณ 1:5,000 ถึง 1:35,000 มีระดับความสูงของพื้นที่อยู่ระหว่าง 20-50 เมตร รทก. รวมความยาวตลอดลำน้ำประมาณ 735 กิโลเมตร ซึ่งกลุ่มน้ำยมประกอบด้วยลำน้ำสาขาที่สำคัญ ได้แก่ ลำน้ำควน ไหลมาบรรจบกับแม่น้ำยมที่อำเภอปง จังหวัดพะเยา ลำน้ำบี๋ ไหลมาบรรจบกับแม่น้ำยมที่อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา ลำน้ำจาว ไหลมาบรรจบกับแม่น้ำยมในเขตจังหวัดแพร่ น้ำแม่สองบรรจบกับแม่น้ำยมที่อำเภอสอง จังหวัดแพร่ น้ำแม่คำมีไหลมาบรรจบกับแม่น้ำยมที่อำเภอหนองม่วงไข่ จังหวัดแพร่ น้ำแม่ต้าไหลมาบรรจบกับแม่น้ำยมที่อำเภอลอง หัวแม่สิมไหลมาบรรจบแม่น้ำยมที่อำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย น้ำแม่มอกไหลมาบรรจบกับแม่น้ำยมที่อำเภอบ้านด่านลานหอย จังหวัดสุโขทัย น้ำแม่รำพันบรรจบกับแม่น้ำยมที่อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย และแม่น้ำพิจิตรไหลมาบรรจบกับแม่น้ำยมที่บ้านบางคลาน อำเภอโพทะเล จังหวัดพิจิตร

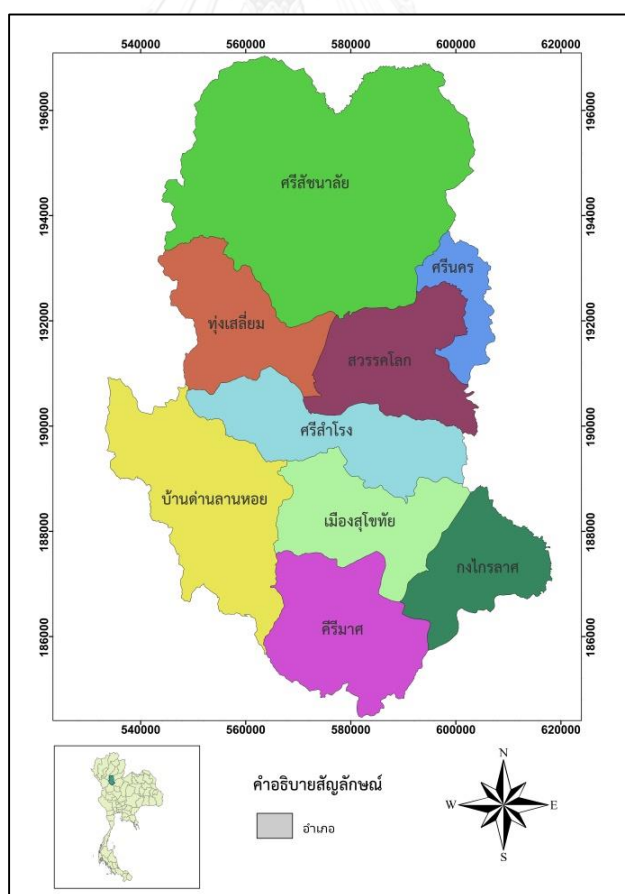
การแบ่งกลุ่มน้ำสาขาในกลุ่มน้ำยม ได้กำหนดตามผลการศึกษาของโครงการศึกษาสำรวจออกแบบสถานีอุทกวิทยา 25 กลุ่มน้ำหลักของประเทศไทย โดยกรมทรัพยากรน้ำ โดยพิจารณาหลักเกณฑ์การ

แบ่งขอบเขตลุ่มน้ำสาขา การเรียกชื่อลุ่มน้ำ ลำน้ำ และการกำหนดรหัสลุ่มน้ำ โดยยึดถือตาม “มาตรฐานลุ่มน้ำและลุ่มน้ำสาขา” ของคณะกรรมการศูนย์ข้อมูลสารสนเทศอุทกวิทยา (น้ำผิวดิน) ภายใต้คณะกรรมการอุทกวิทยาแห่งชาติ (ปัจจุบันได้รวมอยู่ในกรมทรัพยากรน้ำ) ซึ่งปรากฏอยู่ใน รายงานผลการวิจัย เรื่อง ทะเบียนประวัติ และแผนที่แสดงตำแหน่งสถานีอุทกวิทยาและอุตุนิยมวิทยา ในประเทศไทย (กุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2539) เป็นแนวทางในการดำเนินงาน และได้ทำการปรับเพิ่มเติม หลักเกณฑ์บางประการให้ชัดเจนและสมบูรณ์ขึ้น โดยมีการนำข้อมูลจากแหล่งต่างๆ มาพิจารณาร่วม ได้แก่ แผนที่การแบ่งขอบเขตลุ่มน้ำของหน่วยงานต่างๆ ในระบบ GIS รายงานการศึกษา แผนที่แสดง ขอบเขตพื้นที่ชลประทาน แนวคันกั้นน้ำท่วม และการสำรวจสนามในบางพื้นที่ รวมทั้งได้ใช้แผนที่ภูมิ ประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ชุดปัจจุบันจากกรมแผนที่ทหารมาใช้ในการกำหนดขอบเขตลุ่มน้ำ ซึ่ง แบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยออกเป็น 11 ลุ่มน้ำสาขา ดังรูปที่ 1-1



รูปที่ 1-1 ลักษณะทางกายภาพลุ่มน้ำยม

สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำบาดาลในการศึกษารังนี้เลือกพื้นที่ศึกษา โดยใช้พื้นที่จังหวัดสุโขทัยเป็นพื้นที่ตัวแทนแอ่งน้ำบาดาล เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ประสบทั้งปัญหาอุทกภัย อันเนื่องมาจากสภาพฝนตกหนักทางตอนเหนือของพื้นที่ ทำให้มีปริมาณน้ำไหลลงสู่ลำน้ำยมปริมาณมาก ประกอบกับขนาดของลำน้ำยมที่ผ่านจังหวัดสุโขทัย ในช่วงตอนบนความจุลำน้ำประมาณ 2,004 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และค่อยๆ มีขนาดแคบลง ตามลำดับ โดยลำน้ำยมที่ไหลผ่านอำเภอเมืองสุโขทัย มีขนาดความจุเพียง 342 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ทำให้น้ำล้นตลิ่งทุกๆ ปี ในฤดูแล้งจังหวัดสุโขทัยประสบปัญหาภัยแล้ง ทำให้มีการนำน้ำบาดาลในระดับตื้นมาใช้เพื่อการเกษตร อุตสาหกรรม และการอุปโภคบริโภค ประกอบกับปัจจุบันราคาพืชผลทางการเกษตรมีราคาสูงขึ้นมาก จึงมีการเจาะบ่อน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยมีการเจาะบ่อน้ำบาดาล 2 ระดับ ได้แก่ บ่อน้ำบาดาลระดับตื้นซึ่งเจาะโดยเกษตรกรในพื้นที่ และบ่อน้ำบาดาลระดับตื้นแต่เจาะลึกกว่าโดยกรมชลประทาน เพื่อสูบน้ำบาดาลมาใช้รองรับพื้นที่ทางการเกษตรที่ขยายตัวเพิ่มมากขึ้น โดยปัจจุบันมีการใช้น้ำบาดาลเพื่อการปลูกข้าวถึง 3 ครั้งต่อปี การใช้น้ำบาดาลในปริมาณที่มากเกินไปจนสมดุลดังกล่าว ส่งผลให้เกิดปัญหาระดับน้ำบาดาลในระดับตื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง และระดับน้ำบาดาลเสียสมดุลโดยไม่กลับคืนสู่สภาวะปกติในเวลาอันใกล้



รูปที่ 1-2 พื้นที่จังหวัดสุโขทัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความสัมพันธ์เชิงกลศาสตร์ระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดินในพื้นที่ศึกษา
2. ฐานข้อมูลไอโซโทปเสถียรของน้ำฝน น้ำท่า และน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา
3. ศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา
4. สัดส่วนการเติมน้ำจากชั้นน้ำบาดาลลงสู่แม่น้ำ และสัดส่วนการเติมน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินลงสู่ชั้นน้ำบาดาล



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการศึกษาที่ผ่านมา

การศึกษาความเชื่อมโยงทางชลศาสตร์ระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน และประเมินศักยภาพน้ำบาดาล โดยใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า-น้ำบาดาล และการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร จำเป็นต้องศึกษาองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับน้ำบาดาล สมการการไหลของน้ำบาดาล สมการการเกิดน้ำท่า ค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์และอุทกธรณีวิทยาต่างๆของน้ำบาดาล รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

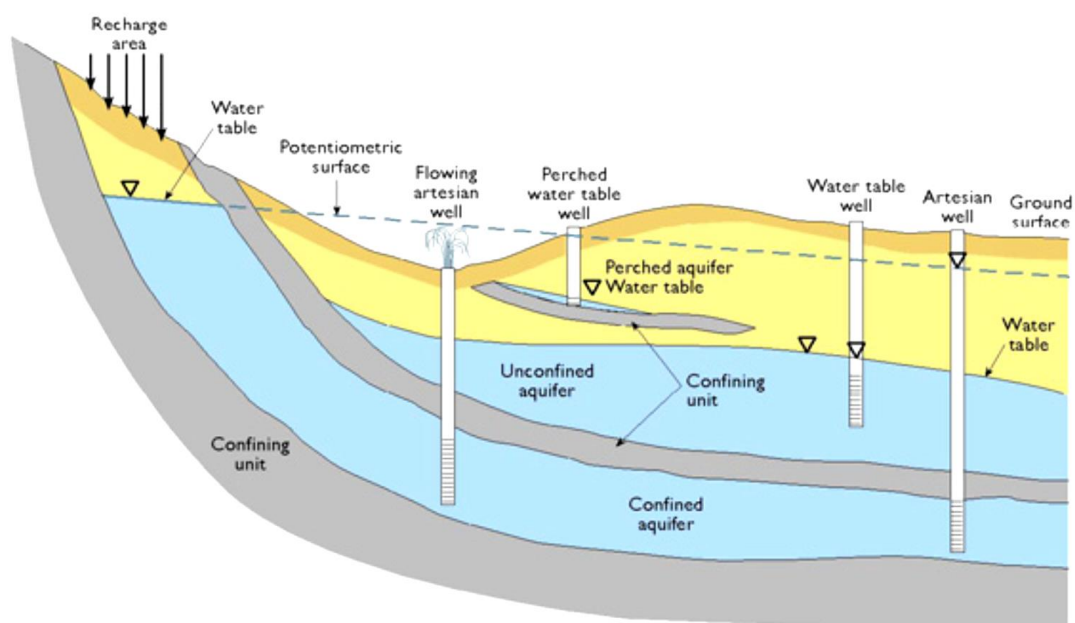
2.1 น้ำบาดาล (Groundwater)

น้ำบาดาล คือ น้ำที่มีอยู่ในชั้นดินบนพื้นผิวโลก โดยเป็นน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของชั้นดินหรือหิน ซึ่งเกิดจากการซึมผ่านของน้ำผิวดินลงไปกักเก็บอยู่ใต้ดิน และมีการเคลื่อนที่ไปตามช่องว่างดังกล่าว โดยในทางอุทกธรณีวิทยาจะมีการแบ่งชั้นน้ำบาดาลออกเป็น 3 ประเภท (Freeze & Cherry, 1979) คือ

1. ชั้นน้ำบาดาลไร้แรงดัน (Unconfined Aquifer) หมายถึง ชั้นดิน หรือชั้นหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เป็นชั้นดินชั้นหินอิสระที่ไม่ได้อยู่ภายใต้แรงดัน กล่าวคือชั้นดินชั้นหินที่ให้น้ำนี้ จะไม่มีชั้นหินที่บีบน้ำปิดทับอยู่ ระดับน้ำสูงสุดของชั้นนี้เรียกว่า “ระดับน้ำบาดาล (Water Table)” ซึ่งการไหลของน้ำบาดาลในชั้นนี้ จะไหลไปตามความลาดเอียงของระดับน้ำบาดาลภายใต้แรงดึงดูดของโลก หากทำการเจาะบ่อน้ำบาดาล ระดับน้ำในบ่อนั้นจะมีระดับเดียวกับระดับน้ำบาดาลรอบๆ บ่อ

2. ชั้นน้ำบาดาลมีแรงดัน (Confined Aquifer) หมายถึง ชั้นดิน หรือชั้นหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ถูกควบคุมโดยโครงสร้างต่างๆ ทางธรณีวิทยา ซึ่งการไหลของน้ำบาดาลจะถูกควบคุมโดยระดับแรงดันภายในชั้นน้ำบาดาล หากทำการเจาะบ่อน้ำบาดาลลงไปถึงชั้นให้น้ำนี้ แรงดันที่มีอยู่จะดันให้น้ำมีระดับสูงขึ้นไปอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งในบ่อ ซึ่งหากระดับแรงดันของน้ำบาดาลในชั้นให้น้ำนั้นสูงมาก น้ำในบ่อก็จะพุหรือพุ่งขึ้นมาเอง โดยไม่ต้องมีการสูบ

3. ชั้นน้ำบาดาลปลอม (Perch Aquifer) หมายถึง ชั้นดิน หรือชั้นหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ มีลักษณะเป็นกระเปาะ มีชั้นดินเหนียวรองรับอยู่ด้านล่าง อยู่ในชั้นที่สัมผัสกับอากาศเหนือชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อน้ำฝนซึมลงมาสะสมอยู่ น้ำบางส่วนจะถูกกักเก็บไว้ที่กระเปาะนี้ หากเราทำการเจาะบ่อน้ำบาดาลสูบขึ้นมาใช้ ไม่นานน้ำก็จะหมดไป แต่จะกลับมีน้ำได้อีกเมื่อฝนตก



รูปที่ 2-1 ชั้นน้ำบาดาล

ที่มา (Unesco, 1983)

2.2 การไหลของน้ำบาดาล (Groundwater Flow)

ในธรรมชาตินั้น น้ำบาดาลจะมีการเคลื่อนที่ไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือหิน ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดินหรือหิน และหลักการทางชลศาสตร์ โดยปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการไหลของน้ำบาดาล ได้แก่ แรงโน้มถ่วงของโลก ความดันบรรยากาศ ความดันอันเนื่องมาจากแรงกดทับของน้ำ ฯลฯ (ระมิงค์วงศ์., 2546) โดยจากการทดลองของดาร์ซี (Darcy) พบว่า ความเร็วของการไหลของน้ำผ่านตัวกลางมีรูพรุน มีความสัมพันธ์กับความแตกต่างระดับพลังงานของน้ำและระยะทางที่น้ำเคลื่อนที่ โดยเป็นไปตามสมการการไหลของน้ำบาดาลของกฎดาร์ซี (Darcy's Law) ดังสมการที่ 2.1

$$V = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2.1)$$

โดย	V	คือ ความเร็วในการไหลของน้ำบาดาล (m/s)
	K	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) (m/s)
	Δh	คือ ความแตกต่างของระดับน้ำ (m)
	Δl	คือ ระยะทางวัดตามความเร็วเฉลี่ยการไหล (m)

2.3 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย (Safe Yield) และปริมาณการใช้น้ำสูงสุดที่ยอมรับได้ (Allowable Yield) โดย (Sophocleous, 1997) กล่าวว่า ปริมาณการใช้น้ำบาดาลที่ปลอดภัย (Safe Yield) หมายถึง ปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อแหล่งน้ำ คุณภาพน้ำ การทรุดตัวของแผ่นดินและอื่นๆทั้งในระยะสั้นและระยะยาว หากมีการใช้น้ำบาดาลที่มากเกินไปกว่าปริมาณน้ำปลอดภัยหรือภาวะที่อาจเกิดผลกระทบที่ไม่พึงปรารถนาได้ เช่น ระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่สามารถสูบมาใช้ได้อีกต่อไป เป็นต้น สำหรับคำว่าปริมาณการใช้น้ำปลอดภัย (Safe Yield) มีความหมายค่อนข้างกว้างและมีความหมายใกล้เคียงกับคำอื่นเป็นจำนวนมาก เช่น Permissible Yield, Perennial Yield เป็นต้น

ปริมาณการใช้น้ำสูงสุดที่ยอมรับได้ (Allowable Yield) หมายถึง ปริมาณการใช้น้ำให้เกิดประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้สูงสุดภายใต้เงื่อนไขของผลกระทบที่ยอมรับได้ ศักยภาพของแหล่งน้ำบาดาล โดยหลักการทั่วไปอาจพิจารณาจากปริมาณน้ำที่เติมให้กับชั้นน้ำในระยะยาว รวมทั้งพิจารณาถึงอัตราการไหลของน้ำสู่ชั้นน้ำที่ต่อเนื่องกันและชั้นน้ำที่อยู่ทางท้ายน้ำด้วย (Foster et al., 2000)

ปริมาณน้ำที่ยอมให้สูบได้ (Permissible Yield) คือ ปริมาณน้ำที่สามารถสูบขึ้นมาใช้การได้จากการพิจารณาในเรื่องผลประโยชน์ที่จะได้รับกับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในพื้นที่นั้นและได้ใช้น้ำใต้ดิน

แนวทางการประเมินศักยภาพน้ำบาดาลสามารถสรุปได้เป็น 3 แนวทางหลัก (คุณธนกุลวงศ์, 2551) คือ การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลโดย 1) การคำนวณศักยภาพโดยพิจารณาปริมาณกักเก็บน้ำบาดาล (สมดุลงน้ำ) 2) การคำนวณศักยภาพจากการคืนตัวของระดับน้ำบาดาล และ 3) การประเมินศักยภาพโดยใช้แบบจำลองน้ำบาดาล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การประเมินศักยภาพโดยพิจารณาสมดุลงน้ำ

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลโดยคำนึงถึงปริมาณน้ำบาดาลที่กักเก็บไว้ในแหล่งน้ำบาดาลที่ไม่ให้มีการลดลงของปริมาณน้ำบาดาลลงอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือพิจารณาถึงสภาวะสมดุลของปริมาณน้ำในแอ่งน้ำบาดาล โดย การเปลี่ยนแปลงของปริมาณที่กักเก็บ = ปริมาณการเติมเข้าสู่แอ่งน้ำ + ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าแอ่ง - ปริมาณน้ำที่ถูกใช้ ซึ่งวิธีนี้คำนึงถึงปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณน้ำที่ไหลออกจากแอ่งน้ำบาดาลทั้งหมดในรอบปี นั่นคือรักษาสมดุลของแอ่งน้ำบาดาลโดยให้ปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณน้ำที่ไหลออกหรือปริมาณที่สูบขึ้นมาใช้มีค่าเท่าๆกัน ปริมาณน้ำที่สูบ

ขึ้นมาใช้นี้คือศักยภาพของแอ่งน้ำบาดาล หากปริมาณน้ำไหลเข้ามาเพียงพอสอดคล้องกับปริมาณการใช้น้ำบาดาล ปริมาณน้ำก็เก็บจะไม่ลดลงไป ซึ่งถือว่าแอ่งน้ำบาดาลยังมีศักยภาพสามารถให้น้ำบาดาลได้

2) การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลจากการคืนตัวของระดับน้ำ

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลเบื้องต้นจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในรอบปี พื้นที่ของแหล่งน้ำบาดาล และปริมาณน้ำจำเพาะ (Specific Yield) ในกรณีของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดัน (Unconfined Aquifers) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักน้ำ (Storage Coefficient) แทนปริมาณน้ำจำเพาะ โดย ปริมาณที่เก็บกัก = การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ \times พื้นที่ของชั้นน้ำ \times สัมประสิทธิ์ของการเก็บกักน้ำ

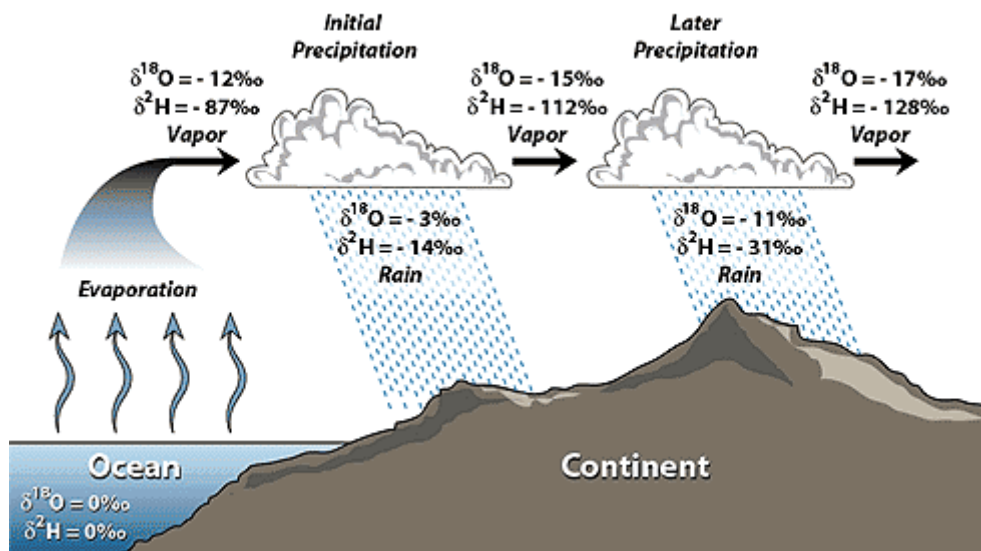
3) การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลอง

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสภาพของน้ำบาดาล มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพของปริมาณฝน ปริมาณการใช้น้ำและปัจจัยอื่นๆ ดังนั้น การนำเอาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเหล่านี้มาพิจารณาโดยอาศัยแบบจำลองน้ำบาดาล ทำให้การประเมินมีความแม่นยำขึ้น และสามารถประเมินศักยภาพในแต่ละชั้นน้ำภายใต้ภาวะเงื่อนไข ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความแม่นยำของแบบจำลอง ซึ่งขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลนำเข้าแบบจำลองด้วย

2.4 อุทกวิทยาไอโซโทป (Isotope Hydrology)

ไอโซโทป คือ ลักษณะการจัดกลุ่มของธาตุชนิดหนึ่งๆ ที่มีจำนวนโปรตอนเท่ากัน แต่จำนวนนิวตรอนต่างกัน ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของแต่ละไอโซโทปแตกต่างกัน เช่น น้ำหนักโมเลกุล ความหนาแน่นของพันธะทางเคมี จุดเดือด จุดหลอมเหลว เป็นต้น โดยยังคงคุณสมบัติทางเคมีเหมือนกัน

ลักษณะความแตกต่างทางกายภาพของไอโซโทป ได้นำมาใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสัดส่วนไอโซโทปของน้ำ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดวงจรอุทกวิทยา ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ลักษณะไอโซโทปของน้ำในวงจรรอุทกวิทยา

ที่มา (Hoefs & Hoefs, 1997)

ลักษณะไอโซโทปของน้ำ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านกระบวนการทางอุทกวิทยา เริ่มจากน้ำในมหาสมุทรจะมีค่าสัดส่วนไอโซโทปเท่ากับ 0 ‰ เมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิพื้นผิวน้ำทะเล ไอโซโทปชนิดเบาจะเกิดการระเหยออกไป สรุปได้ว่า ถ้าโมเลกุลมีน้ำหนักเบา ค่าสัดส่วนไอโซโทปหนักต่อไอโซโทปเบาจะมีค่าติดลบมาก โดยอาศัยปัจจัยดังนี้ 1) อุณหภูมิ 2) ความสูงของภูมิประเทศ 3) ระยะห่างจากมหาสมุทร 4) ปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่ เป็นต้น

การศึกษาแหล่งน้ำบาดาลโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ไอโซโทปแวดล้อม (Environmental Isotope) เพื่อใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับน้ำบาดาล โดยอาศัยลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไอโซโทปในปริมาณน้ำไหลเข้า ตามสมการความสมดุลของแหล่งน้ำบาดาล (สมการที่ 2.2) เพื่อหาต้นกำเนิดและแหล่งเติมน้ำ รวมทั้งคุณสมบัติการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเพื่อหาแหล่งกำเนิดและอายุของน้ำในแหล่งน้ำบาดาล ดังสมการที่ 2.2

$$I - O = \Delta S \tag{2.2}$$

- โดย I คือ ปริมาณน้ำไหลเข้าต่อหน่วยเวลา
- O คือ ปริมาณน้ำไหลออกต่อหน่วยเวลา
- ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำสำรองในระบบน้ำบาดาลต่อหน่วยเวลา

ไอโซโทปแวลด้อมที่ใช้ในการศึกษามีทั้งไอโซโทปเสถียร (Stable Isotope) ซึ่งเป็นไอโซโทปของธาตุซึ่งประกอบเป็นโมเลกุลของน้ำ ได้แก่ ออกซิเจน-18 (^{18}O) และ ดิวทีเรียม (^2H หรือ D) และ ไอโซโทปกัมมันตรังสี (Radioactive Isotope) คือ คาร์บอน-14 (C-14) และ ทริเทียม (^3H)

2.4.1 ไอโซโทปเสถียร (Stable Isotope)

การศึกษาในครั้งนี้ มุ่งเน้นหาความสัมพันธ์ทางชลศาสตร์ระหว่างน้ำผิวดินและน้ำบาดาล โดยอาศัยลักษณะองค์ประกอบไอโซโทปเสถียร ที่มีความแตกต่างกันของน้ำฝน น้ำท่า และน้ำบาดาล สามารถอธิบายลักษณะความเชื่อมโยงดังกล่าวได้ จากปริมาณไอโซโทปเสถียรที่มีความคงตัว และไม่สลายไปตามกาลเวลา

ไอโซโทปเสถียรนั้นเป็นไอโซโทปที่มีความคงตัวและไม่สลายตัวไปตามกาลเวลา เกิดอยู่ในธรรมชาติและมีมากที่สุด คือ ออกซิเจน-16 (^{16}O) มีประมาณ 99.759 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดิวทีเรียมมีประมาณ 0.015 เปอร์เซ็นต์ และออกซิเจน-18 มีประมาณ 0.2039 (Gat & Gonfiantini, 1981) เนื่องจากการวัดอัตราส่วนความอุดมสมบูรณ์แท้จริงของไอโซโทป ไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากแหล่งน้ำในธรรมชาติ หรือสารประกอบอื่นๆ แต่จะวัดหาค่าความแตกต่างของอัตราส่วนของไอโซโทป เปรียบเทียบกับไอโซโทปซึ่งมีความอุดมสมบูรณ์มากกว่า กับตัวอย่างอ้างอิง ความแตกต่างนี้จะแสดงโดยอักษรกรีก (เดลต้า) มีหน่วยเป็นส่วนหนึ่งในพัน (Per mil, ‰) ดังแสดงในสมการที่ 2.3 (บัวผัน., 2538)

$$\delta \text{ ตัวอย่าง} = \left(\frac{R \text{ ตัวอย่าง} - R \text{ ตัวอย่างอ้างอิง}}{R \text{ ตัวอย่างอ้างอิง}} \right) \quad (2.3)$$

โดย R หมายถึง อัตราส่วนของไอโซโทปหนักต่อไอโซโทปเบา เช่น $\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ และ $\frac{\text{D}}{\text{H}}$

ค่า δ เป็นค่าบวกแสดงถึงสัดส่วนของไอโซโทปหนักมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับอัตราส่วนของไอโซโทปหนักอ้างอิง ในทางตรงข้ามถ้ามีค่าเป็นลบ แสดงถึงไอโซโทปหนักมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากความแตกต่างระหว่างตัวอย่างกับตัวอย่างอ้างอิงมีค่าน้อยมาก ดังนั้น เพื่อความสะดวกจึงแสดงค่าเดลต้า ในหน่วย ‰ เรียกว่า เปอร์มิลล์ (Per Mil) ซึ่ง $\delta(\text{‰}) = \delta \times 1000$ สำหรับค่าตัวอย่างอ้างอิงมาตรฐานจะใช้ตามมาตรฐานของ SMOW (Standard Mean Ocean Water) และ V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) เหตุผลที่ใช้ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างน้ำมหาสมุทรเป็นตัวอย่างมาตรฐานการอ้างอิง เพราะน้ำในมหาสมุทรคิดเป็น 98 % ของน้ำบนพื้นผิวโลก และมีส่วนประกอบของไอโซโทปที่คล้ายคลึงกัน และเป็นจุดรากฐานของการเคลื่อนตัวของน้ำ ในวัฏจักร

ของน้ำ โดยทั่วไปค่า $\delta^{18}\text{O}$ และ δD ของน้ำบรรยากาศ (Meteoric Water) จากมหาสมุทรถึงแผ่นดิน จะเปลี่ยนแปลงไปตามความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.4

$$\delta\text{D} = a \delta^{18}\text{O} + d \quad (2.4)$$

โดย δD หมายถึง ความต่างอัตราส่วนของไอโซโทป $\frac{\text{D}}{\text{H}}$ ตัวอย่าง เทียบกับ ตัวอย่าง

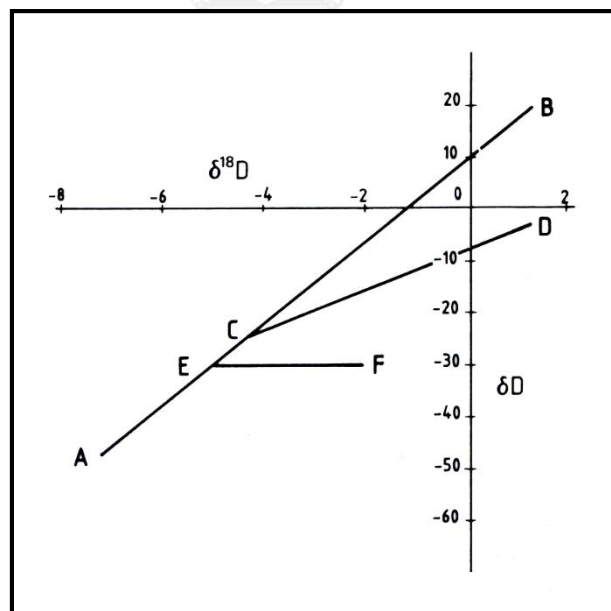
อ้างอิงจากทะเลเวียนนา ประเทศออสเตรเลีย

$\delta^{18}\text{O}$ หมายถึง ความต่างอัตราส่วนของไอโซโทป $\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ ตัวอย่าง เทียบกับ

ตัวอย่างอ้างอิงจากทะเลเวียนนา ประเทศออสเตรเลีย

d หมายถึง ค่าดิวทีเรียมส่วนเกิน (Deuterium Excess)

โดยค่าเฉลี่ยทั่วโลกสำหรับน้ำฝน ค่า a จะมีค่าเท่ากับ 8 ส่วนค่าเฉลี่ยทั่วโลกของค่า d สำหรับน้ำฝนมีค่าเท่ากับ 10 ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 2-2

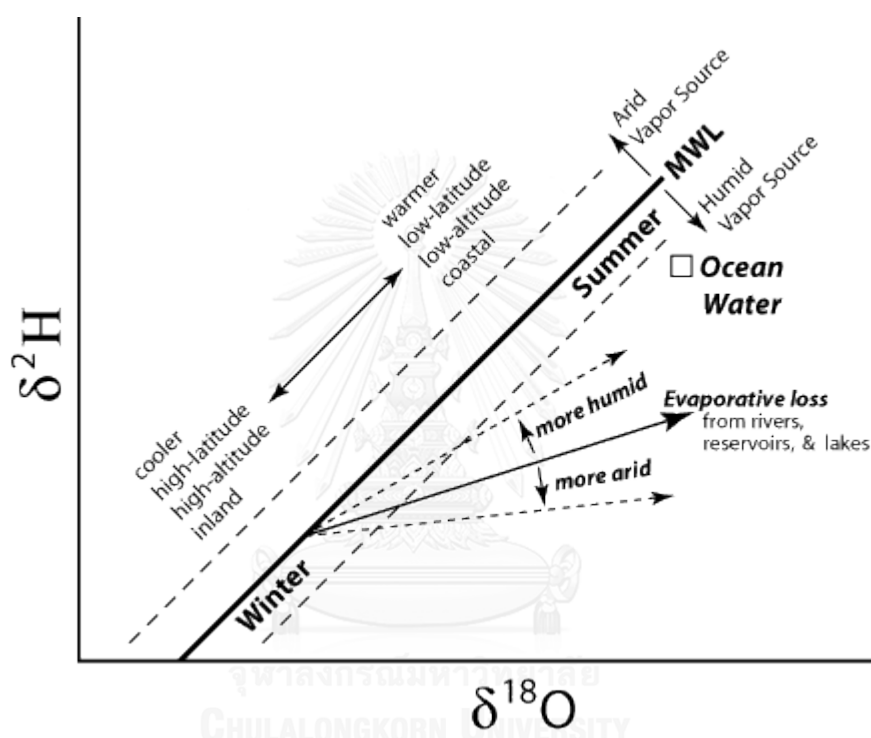


รูปที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deuterium และ O-18

ทีมา (Hoefs & Hoefs, 1997)

ความสัมพันธ์ของค่า δD และ $\delta^{18}O$ เส้น AB เป็นเส้นน้ำบรรยากาศเฉลี่ยทั่วโลก (The Average Global Meteoric Water Line) เส้น CD เป็นเส้นของการระเหย (Evaporation Line) เส้น EF เป็นเส้นแสดงส่วนประกอบไอโซโทปของน้ำร้อนจากระบบความร้อนใต้พิภพ ดัดแปลงจาก (Leontiadis et al., 1983)

เส้นน้ำบรรยากาศ (Meteoric Water Line) เกิดจากการนำค่าสัดส่วนไอโซโทปของน้ำฝนในพื้นที่ เพื่อสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง อีกทั้งยังสามารถอธิบายถึงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่นั้นๆ ได้ ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 เส้นน้ำบรรยากาศ (Meteoric Water Line)

ที่มา (Hoefs & Hoefs, 1997)

ลักษณะภูมิอากาศในพื้นที่ สามารถอธิบายได้ด้วยเส้นน้ำบรรยากาศ (Meteoric Water Line) ได้ เช่น ค่าความชันของเส้นตรง สามารถบ่งบอกถึงปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในพื้นที่ หากมีความชัน (Slope) มาก แสดงว่ามีความชื้นสัมพัทธ์สูง และค่าจุดตัดแกนตั้ง ซึ่งเรียกว่า ค่าดิวทีเรียมส่วนเกิน (Deuterium Excess) สามารถบ่งบอกต้นกำเนิดของฝนได้ หากมีค่าดิวทีเรียมส่วนเกินมาก แสดงว่า พื้นที่นั้นๆ มีต้นกำเนิดของฝน ซึ่งถูกพัดพามาจากพื้นที่แห้งแล้ง หรือไกลจากมหาสมุทร

หลักการสำคัญของการวิเคราะห์ส่วนประกอบไอโซโทปเสถียรเพื่อการศึกษาแหล่งน้ำ คือ โดยทั่วไปค่า $\delta^{18}O$ และ δD จะต่างกันในน้ำที่มีต้นกำเนิดต่างกัน โดยที่ค่า δD และ $\delta^{18}O$ ของน้ำฝน

จะขึ้นอยู่กับสถานที่ที่น้ำฝนตกลงมา น้ำฝนที่ตกลงมาในแผ่นดินที่ไกลจากมหาสมุทรและมีระดับความสูงของภูมิประเทศมาก จะมีค่า δD และ $\delta^{18}O$ น้อยกว่าในน้ำฝนที่ตกลงมา ในบริเวณใกล้ชายฝั่งซึ่งมีอากาศร้อนกว่า เช่น น้ำฝนในบริเวณกรุงเทพมหานคร ระหว่างปี ค.ศ. 1968-1987 มีค่าเฉลี่ย $\delta^{18}O$ เท่ากับ -6.60 ‰ และค่า δD เท่ากับ -43.6 ‰ ส่วนน้ำฝนที่หลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว $\delta^{18}O$ มีค่า -7.50 ‰ และ δD มีค่า -50 ‰ จะเห็นว่า $\delta^{18}O$ และ δD ในน้ำฝนที่หลวงพระบางมีค่าต่ำกว่าน้ำฝนในกรุงเทพมหานคร ทั้งนี้ เนื่องจากกระยะทางห่างจากทะเลของหลวงพระบางมากกว่ากรุงเทพมหานคร และพื้นที่ที่มีความสูงมากกว่า ดังนั้น $\delta^{18}O$ จะใช้ในการหาต้นกำเนิดของน้ำที่มาจากที่ต่างๆ กันได้เป็นอย่างดี สำหรับกระบวนการที่จะทำให้เกิด δD และ $\delta^{18}O$ ของน้ำเปลี่ยนแปลงมีอยู่ 2 อย่าง คือ กระบวนการระเหย และความร้อนที่เกิดจากหินละลายภายในโลก กระบวนการระเหยจะทำให้ δD และ $\delta^{18}O$ ในน้ำมีค่ามากขึ้น ไอโซโทปของน้ำเป็นอีกเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยหาความสัมพันธ์ทางศาสตร์ของวงจรมวลน้ำ โดยประยุกต์จากสมการสมดุลน้ำ ดังสมการที่ 2.5

$$\nabla V = P - E + S_i - S_o + G_i - G_o \quad (2.5)$$

โดย	∇V	คือ	ปริมาณน้ำที่เปลี่ยนในช่วงเวลาหนึ่ง
	P	คือ	ปริมาณฝนที่ตก
	E	คือ	อัตราการระเหย
	S_i	คือ	อัตราการไหลเข้าของน้ำท่า
	S_o	คือ	อัตราการไหลออกของน้ำท่า
	G_i	คือ	อัตราการไหลเข้าของน้ำบาดาล
	G_o	คือ	อัตราการไหลออกของน้ำบาดาล

จากสมการสมดุลมวลน้ำข้างต้น จะได้สมการสมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทป (Isotope Mass Balance Equation) โดยใช้ δD และ $\delta^{18}O$ ตามสมการที่ 2.6 ดังนี้

$$\nabla V \delta_L = P \delta_P - E \delta_E + S_i \delta_i - S_o \delta_o + G_i \delta_{Gi} - G_o \delta_o \quad (2.6)$$

โดย	δ_L	คือ	สัดส่วนไอโซโทปของน้ำที่ไหลออกระบบ
	δ_P	คือ	สัดส่วนไอโซโทปของปริมาณฝนที่ตก
	δ_E	คือ	สัดส่วนไอโซโทปของน้ำที่ระเหย
	δ_i	คือ	สัดส่วนไอโซโทปน้ำท่าที่ไหลเข้าระบบ
	δ_{Gi}	คือ	สัดส่วนไอโซโทปน้ำบาดาลที่ไหลเข้าระบบ

ในทฤษฎีไอโซโทปจะกำหนดองค์ประกอบไอโซโทปของปริมาณน้ำท่าที่ไหลออกอ่าง และ ไอโซโทปของปริมาณน้ำบาดาลไหลเข้าอ่าง มีค่าเท่ากัน ซึ่งจากสมการข้างต้น ทำให้สามารถหา ปริมาณการไหลเข้าของน้ำบาดาลได้ ดังสมการที่ 2.7

$$G_i = \frac{P\delta_P - E\delta_E + S_i\delta_i - (P - E + S_i - \nabla V)\delta_L - \nabla V\delta_L}{(\delta_L - \delta_{G_i})} \quad (2.7)$$

ในสมการข้างต้นจะสมมติให้พื้นที่ศึกษาอยู่ในสภาวะการไหลคงที่ (Steady State) โดย กำหนดให้ ∇V และ $\nabla V\delta_L$ มีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2-5 สถานีอุทกนิยามเครือข่ายติดตามวิเคราะห์ส่วนประกอบไอโซโทปในน้ำฝน

ดัดแปลงจาก (Leontiadis et al., 1983)

การใช้เทคนิคไอโซโทปในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับน้ำบาดาล สำหรับไอโซโทปเสถียร (Stable Isotopes) จะใช้หาต้นกำเนิดหรือบริเวณที่น้ำจะไหลเพิ่มเติมเข้าไปยังแหล่งกักเก็บ นอกจากนี้ ยังสามารถทราบถึงบริเวณที่น้ำไหลเข้าไปเพิ่มเติมในแหล่งกักเก็บ และกลไกการไหลซึมของน้ำฝนลงใต้ดิน ข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญสำหรับการวางแผนพัฒนาและจัดการแหล่งน้ำบาดาล ตลอดจนการป้องกัน แก้ไขวิกฤตการณ์น้ำบาดาลที่จะเกิดขึ้น

2.4.2 การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลสำหรับวิเคราะห์ไอโซโทป

การเก็บตัวอย่างน้ำเป็นการเก็บจากบ่อน้ำบาดาล อ่างเก็บน้ำและบึงต่างๆ ในบริเวณที่ศึกษา การเลือกบ่อน้ำบาดาลที่จะเก็บตัวอย่างขึ้นอยู่กับชั้นน้ำบาดาลและการกระจายตัวออกไปในบริเวณที่ คาดว่าจะเป็นแหล่งรับน้ำเพิ่มเติม โดยแบ่งการเก็บน้ำตัวอย่างออกเป็นกรเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อ วิเคราะห์หาออกซิเจน-18 และดิวทีเรียม (Sharp, 2007)

การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจากบ่อน้ำบาดาลมีวิธีการเก็บง่าย คือ สูบน้ำทิ้งไว้ระยะหนึ่ง แล้วเก็บ น้ำใส่ลงในขวดแก้วที่แห้งและสะอาดปริมาณอย่างน้อย 2 ลิตร ขวดเก็บตัวอย่างน้ำ ควรเป็นขวดแก้วมี คุณสมบัติในการซึมผ่านของอากาศต่ำ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนๆ ระหว่างตัวอย่างกับสิ่งแวดล้อม ปิดฝา ให้สนิท บันทึกรายละเอียดบ่อน้ำบาดาล ณ วันที่เก็บตัวอย่าง แล้วส่งห้องวิเคราะห์ต่อไป สำหรับการเก็บ ตัวอย่างน้ำบาดาลเพื่อวิเคราะห์ไอโซโทปเสถียร (Stable Isotopes) จะเก็บใส่ขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร ปิดฝาให้แน่น ตัวอย่างน้ำที่วิเคราะห์หาไอโซโทปเสถียร ส่งไปวิเคราะห์ยังสถาบันเทคโนโลยี นิวเคลียร์แห่งชาติ กรุงเทพมหานคร ซึ่งได้รับความช่วยเหลือในการจัดตั้งห้องวิเคราะห์จากทบวง การพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ภายใต้โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง กรมทรัพยากรน้ำ บาดาล และสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี ได้รับความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่กองวิเคราะห์ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล



รูปที่ 2-6 การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร

ที่มา (Unesco, 1983)

2.5 แบบจำลอง ArcSWAT

แบบจำลอง ArcSWAT (Soil and Water Assessment Tool) เป็นแบบจำลองทางอุทก วิทยาที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่า การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของ ปริมาณน้ำท่าจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ซึ่งได้แก่ น้ำท่า ตะกอน และสารเคมีจากการ เกษตรกรรม ของพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่และมีระบบที่สลับซับซ้อน (Large-Complex Watershed)

อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพดินและการใช้ที่ดิน (วังพิณูล., 2552) โดยแบบจำลองนี้ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องภายใต้ความร่วมมือระหว่าง Blackland Research Center, TAES กับ United States Department of Agriculture–Agricultural Research Service (USDA-ARS) ตั้งตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 จนถึงเวอร์ชันล่าสุดในปี ค.ศ. 2000 ซึ่งได้มีการนำข้อมูลระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) ผ่านโปรแกรม ArcView มาประยุกต์ใช้กับแบบจำลอง SWAT และถูกเรียกว่า ArcSWAT (Arcview SWAT) นอกจากนี้ แบบจำลอง ArcSWAT ยังเป็นแบบจำลองประเภท Public Domain ที่ผู้พัฒนาอนุญาตให้บุคคลทั่วไปสามารถดาวน์โหลดแบบจำลองทางอินเทอร์เน็ตไปใช้ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายแต่อย่างใด อีกทั้งแบบจำลอง ArcSWAT ยังเผยแพร่ Source Code ให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปพัฒนาต่อได้อีกด้วย

นอกจากนี้ แบบจำลอง ArcSWAT ยังสามารถจำลองกระบวนการทางกายภาพต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในลุ่มน้ำได้ โดยผู้ใช้จะต้องแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำที่ต้องการศึกษาออกเป็นลุ่มน้ำย่อยๆ ตามลักษณะการใช้ที่ดิน หรือชนิดของดินที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งจะส่งผลให้ลักษณะทางอุทกวิทยาของลุ่มน้ำนั้นเป็นแบบเดียวกัน ส่วนข้อมูลของลุ่มน้ำย่อยที่ผู้ใช้งานต้องกำหนดให้แบบจำลองนั้น ประกอบด้วย ข้อมูลภูมิอากาศ พื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ระดับน้ำบาดาล ลักษณะของดินและการใช้ประโยชน์ที่ดิน ลำน้ำสายหลัก และทางระบายน้ำ ต่าง ๆ เป็นต้น โดยมีส่วนประกอบของแบบจำลอง สรุปได้ดังนี้

2.5.1 ส่วนประกอบของแบบจำลอง (Model Component)

ส่วนประกอบของแบบจำลอง (Model Component) SWAT สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1) การจำลองส่วนของพื้นดิน หรือ ส่วนพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (Upland Phase or Subbasin Component) ดังที่ (Jiang, Huang, & Ruan, 2008) ได้อธิบายไว้ว่า การวิเคราะห์ในส่วนนี้ จะเป็นการศึกษาวัฏจักรทางอุทกวิทยา เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่า ปริมาณการตกตะกอน อุณหภูมิของดิน การเติบโตของพืช ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และปริมาณสารเคมีจากการเกษตรกรรม ก่อนไหลลงสู่ลำน้ำสายหลักในแต่ละลุ่มน้ำย่อย

2) การจำลองส่วนของการเคลื่อนตัวของน้ำ (Routing Phase) จะเป็นการคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านทางน้ำ และการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านอ่างเก็บน้ำ การเคลื่อนตัวของตะกอนในทางน้ำ การพัฒนาและการแพร่กระจายของสารเคมีปนเปื้อนชนิดต่างๆ ในลำน้ำ ตลอดจนทั้งโครงข่ายของระบบลุ่มน้ำที่ทำการศึกษา

แบบจำลองสามารถจำลองได้ทั้งข้อมูลรายวัน รายเดือน และรายปี และสามารถใช้คำนวณต่อเนื่องกันได้ติดต่อกันถึง 100 ปี ซึ่งสามารถแบ่งประเภทข้อมูลที่ใช้สำหรับแบบจำลองได้ 3 กลุ่ม ได้แก่

1. ข้อมูลลักษณะสภาพภูมิประเทศของกลุ่มน้ำ (Watershed Characteristics) ได้แก่ ข้อมูลดิน สภาพของพื้นที่ หรือการใช้ที่ดิน เป็นต้น
2. ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (Climate Characteristics) ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการระเหย ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น
3. ข้อมูลทางด้านอุทกวิทยา (Hydrological Characteristics) ได้แก่ ข้อมูลน้ำท่า ข้อมูลน้ำฝน เป็นต้น

2.5.1.1 การจำลองโมเดลในส่วนของพื้นดิน หรือส่วนพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย

การสร้างแบบจำลองทางด้านอุทกวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย มีพื้นฐานอยู่บนสมการสมดุลของน้ำ (Neitsch, Arnold, Kiniry, Williams, & King, 2005) ดังสมการที่ 2.8

$$SW = SW + \sum(R - Q - ET - P - QR) \quad (2.8)$$

โดย	SW	คือ	Soil Water Content ที่ความตื้น 15 บรรยากาศ
	R	คือ	ค่าของฝนรายวัน (Daily Precipitation)
	Q	คือ	ค่าของน้ำท่ารายวัน (Daily Runoff)
	ET	คือ	ค่าของการระเหยของน้ำรายวัน (Daily Evapotranspiration)
	P	คือ	อัตราการซึมรายวัน (Daily Infiltration)
	QR	คือ	ค่าของอัตราการไหลย้อนกลับรายวัน (Daily Return Flow)

2.5.1.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำ

การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำ มีรายละเอียดพื้นฐานการคำนวณของการเคลื่อนที่ในส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. น้ำท่าผิวดิน (Surface Runoff)

การคำนวณปริมาณของน้ำท่าผิวดินและค่าอัตราการไหลของน้ำท่าสูงสุดโดยใช้ข้อมูล น้ำฝนรายวันด้วยการประยุกต์ใช้ Soil Conservation Service (SCS) Curve Number ซึ่งในการใช้วิธีนี้ ข้อมูลของค่าน้ำฝนรายวัน เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญสำหรับวิธี SCS มาก การวัดปริมาณฝนหลายๆ ตำแหน่ง โดยข้อมูลที่มีช่วงการเก็บข้อมูลฝนที่มีค่าน้อยกว่า 1 วัน จะไม่มีผลต่อแบบจำลอง แต่จะมีผลต่อความละเอียดถูกต้องของการคำนวณน้ำท่า สำหรับการปริมาณอัตราการไหลสูงสุดจะใช้วิธี

Modified Rational Formula น้ำท่าผิวดินจะทำการทำนายจากค่าฝนรายวันโดยการ ใช้สมการ SCS
 ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10

$$Q = \frac{(R-0.2s)^2}{R+0.8s}, R > 0.2s \quad (2.9)$$

$$Q = 0.0, R < 0.2s \quad (2.10)$$

เมื่อ	Q	คือ	ค่าของน้ำท่ารายวัน (m ³ /s)
	R	คือ	ค่าของฝนรายวัน (mm)
	s	คือ	Retention Parameter (mm)

โดยตัวแปร s จะมีความสัมพันธ์กับค่า Curve Number (CN) จากดังสมการสมการที่ 2.11

$$s = 254 \frac{100}{CN} - 1 \quad (2.11)$$

เมื่อ CN คือ ค่า Curve Number หรือค่าความโค้งของการเกิดน้ำท่า

แบบจำลอง SCS เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณหาค่า Surface Runoff โดย สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

1. Infiltration Models เป็นการหาจากการไหลซึมของน้ำลงดิน โดยส่วนของน้ำที่ไม่ไหลซึมลงดินก็คือ Runs Off สำหรับวิธีการหามีด้วยกันหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น วิธีโครงสร้างของดิน (Physically Based) วิธีการประมาณค่าแบบจำลองการไหลซึมโดยประมาณ (Approximate Theory - Based Infiltration Models) Green-Ampt Model วิธีการจากการทดลองวัดค่าการไหลซึม (Empirically Based) เป็นต้น

2. Rainfall Excess Models เป็นแบบจำลองที่คำนวณหาน้ำท่า (Runoff) และส่วนที่ไม่ใช่ น้ำท่าหรือน้ำที่เก็บไว้ที่ผิวดินที่ต่ำ (Surface Depressions) หรือน้ำส่วนที่ค้างบนใบพืช (Intercepted)

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่า CN (Fetter & Fetter, 2001) มีดังนี้ คือ

1 คุณสมบัติทางอุทกวิทยาของดิน (Hydrologic Soil Group)

แบ่งกลุ่มดินออกเป็น 4 กลุ่มคือ A, B, C และ D โดยแต่ละกลุ่มดินจะขึ้นอยู่กับอัตราการซึมน้ำของดินสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1) ดินกลุ่ม A มีอัตราการซึมสูง และอัตราการไหลผิวดินต่ำ ส่วนใหญ่เป็นดินประเภท ดินทราย (Sandy Soils) โดยมีค่า Ksat > 0.76 cm/hr

- 2) ดินกลุ่ม B มีอัตราการซึมปานกลาง เป็นดินที่ระบายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นดินประเภท ดินร่วน (Loam Soils) โดยมีค่า $0.38 < K_{sat} < 0.76$ cm/hr
- 3) ดินกลุ่ม C มีอัตราการซึมต่ำ จะประกอบด้วยชั้นดินอย่างน้อย 1 ชั้น ที่ขัดขวางการระบายน้ำ ส่วนใหญ่เป็นดินประเภทดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay Loam) โดยมีค่า $0.13 < K_{sat} < 0.38$ cm/hr
- 4) ดินกลุ่ม D มีอัตราการซึมต่ำมาก เป็นดินที่มีศักยภาพทำให้เกิดน้ำท่วมดินสูง ส่วนใหญ่เป็นดินประเภทดินเหนียว (Clay) โดยมีค่า $K_{sat} < 0.38$ cm/hr

2. สิ่งปกคลุม (Cover)

คือสิ่งต่างๆ ที่ปกคลุมดินและป้องกันการกระแทกของเม็ดฝนที่ตกลงมาสู่ดิน ประกอบด้วย

- 1) ลักษณะการใช้ที่ดิน (Land Use)
- 2) การรักษาน้ำดิน (Land Treatment) จะเกี่ยวข้องกับลักษณะและวิธีการปลูกพืช การเตรียมแปลงโดยแบ่งออกเป็น การทำการเพาะปลูกเป็นแถว (Straight - Row) การทำการเพาะปลูกเป็นแถวค้อยตามระดับพื้นที่ (Contoured) และการทำการเพาะปลูกเป็นขั้นบันได (Terraced)

3. สภาพอุทกวิทยา (Hydrologic Condition) โดยแบ่งออกเป็น

- 1) สภาพเลว (Poor) มีพืชคลุมดินพื้นที่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์
- 2) สภาพปานกลาง (Fair) มีพืชคลุมดินพื้นที่ระหว่าง 50 - 75 เปอร์เซ็นต์
- 3) สภาพดี (Good) มีพืชคลุมดินพื้นที่มากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์

4. การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use Classification)

- 1) พื้นที่ป่า (Wood, Forest)
- 2) พื้นที่เกษตรกรรม (Agriculture)
- 3) พื้นที่โล่งเตียนและพื้นที่อยู่อาศัย (Bare-Land & Residential)
- 4) พื้นที่ที่เป็นน้ำ (Water Body)

5. เงื่อนไขความชื้นในดินเริ่มต้น (Antecedent Moisture Content; AMC)

มีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นในดิน โดยพิจารณาปริมาณฝนสะสมทั้งหมด ที่ตกก่อนหน้าพายุฝนที่พิจารณา 5 วัน รวมทั้งพิจารณาช่วงฤดูการเพาะปลูกด้วย โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีสำหรับค่า CN จึงต้องมีการปรับแก้ค่า CN ให้อยู่ในกรณีเดียวกับ AMC ในกรณีต่างๆตามเงื่อนไขความชื้นในดินก่อนหน้าทีคำนวณได้โดยในการปรับแก้ค่า CN คำนวณได้ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13

$$CNI = \frac{CNII}{(2.281 - 0.0128CNII)} \quad (2.12)$$

$$CNIII = \frac{CNII}{(0.427 - 0.00573CNII)} \quad (2.13)$$

2. อัตราการไหลสูงสุด (Peak Runoff Rate)

แบบจำลอง SWAT ประมาณค่าอัตราการไหลสูงสุดโดยใช้วิธี Modified Rational Formula แสดงดังสมการที่ 2.14

$$q_p = \frac{CIA}{360} \quad (2.14)$$

เมื่อ	q_p	คือ	อัตราการไหลสูงสุด (ลบ.ม./วินาที)
	C	คือ	สัมประสิทธิ์น้ำท่าที่แสดงถึงลักษณะอัตราการซึมของพื้นที่ลุ่มน้ำ
	I	คือ	ความเข้มของฝน (มม./ชั่วโมง) สำหรับ Time of Concentration ของพื้นที่ลุ่มน้ำ
	A	คือ	พื้นที่การระบายน้ำ (ตารางกิโลเมตร)

3. การไหลทางข้างใต้ผิวดิน (Lateral Subsurface Flow)

การจำลองการไหลทางข้างใต้ผิวดินโดยใช้แบบจำลอง Kinematic Storage Model ซึ่งได้รับการพัฒนาโดยใช้สมการมวลคงที่ Mass Continuity Equation โดยมี Control Volume คือ Soil Profile สำหรับสมการ Mass Continuity Equation ในสมการ Finite Difference สำหรับ Kinematic Storage Model เป็นดังสมการที่ 2.15

$$\frac{SV_2 - SV_1}{t_2 - t_1} = \frac{iL - q_{lat1} - q_{lat2}}{2} \quad (2.15)$$

เมื่อ	SV	คือ	ปริมาณน้ำในดินที่สามารถไหลออกมาจากดินในสวนชุ่มน้ำ (m/m)
	t	คือ	เวลา (hr)
	q_{lat}	คือ	อัตราการไหลทางข้าง (m^3/hr)
	i	คือ	อัตราการไหลเข้าของน้ำในสวนดินชุ่มน้ำ Saturated Zone (m^2/hr)
	L	คือ	Hill Slope Length (m)
	1 และ 2	คือ	ตัวที่อ้างถึงเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดในแต่ละช่วง

4. การไหลของน้ำบาดาล (Groundwater Flow)

การจำลองการไหลของน้ำบาดาลประกอบไปด้วย 4 ส่วน Control Volume คือ ผิวดิน เขตดินชั้นรากพืช Shallow Aquifer และ Deep Aquifer ซึ่งก็คือพื้นที่การไหลของลำน้ำ (Stream flow area) น้ำท่าผิวดินการไหลด้านข้างในเขตรากพืชและน้ำไหลกลับ (Return flow) จาก Shallow Aquifer ซึ่งจะมีน้ำส่วนหนึ่งที่ไหลซึมลึกลงดินสู่ชั้น Deep Aquifer โดยจะเป็นน้ำที่เป็นส่วนที่สูญเสียไปของระบบและจะไม่มีไหลย้อนกลับออกมาสำหรับสมดุลของน้ำสำหรับ Shallow Aquifer แสดงดัง สมการที่ 2.16

$$V_{sa_i} = V_{sa_{j-1}} + Rc - \text{revap} - q_{rf} - \text{perc}_{gw} - WU_{SA} \quad (2.16)$$

เมื่อ	V_{sa}	คือ	ความจุของ Shallow Aquifer
	Rc	คือ	น้ำที่ซึมลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น (Recharge)
	revap	คือ	น้ำที่ไหลจาก Shallow Aquifer กลับสู่ Soil Profile หรือ Root Zone
	q_{rf}	คือ	Return Flow
	perc_{gw}	คือ	น้ำไหลซึมลึกลงดินสู่ชั้น Deep Aquifer
	WU_{SA}	คือ	น้ำใช้การ (Water Use หรือ Withdrawal) จาก Shallow Aquifer
	i	คือ	จำนวนวัน

สำหรับสมดุลของน้ำของ Deep Aquifer แสดงดังสมการที่ 2.17

$$V_{da_i} = V_{da_{i-1}} + \text{perc}_{gw} - WU_{DA} \quad (2.17)$$

เมื่อ	V_{da}	คือ	Deep Aquifer Storage
	perc_{gw}	คือ	น้ำไหลซึมลึกลงดินสู่ชั้น Deep Aquifer
	WU_{DA}	คือ	น้ำใช้การ (withdrawal) จากชั้น Deep Aquifer

5. การระเหยของน้ำ (Evapotranspiration)

สำหรับในแบบจำลองได้มีทางเลือกในการประมาณค่าการระเหยของน้ำ 3 วิธี

1. วิธี Penman–Monteith ต้องการข้อมูลการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ อุณหภูมิของอากาศ ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์
2. วิธี Priestley–Taylor ต้องการข้อมูลการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์และอุณหภูมิของอากาศ
3. วิธี Hargreaves and Samani ต้องการข้อมูลอุณหภูมิของอากาศเพียงอย่างเดียว

6. การเคลื่อนตัวของน้ำผ่านทางน้ำ

แบบจำลอง SWAT ใช้การเคลื่อนตัวของน้ำด้วยวิธีทางอุทกวิทยา (Hydrologic Flow Routing) ด้วยการคำนวณการเคลื่อนตัวของน้ำผ่านทางน้ำเป็นช่วงเวลารายวัน (Daily Time Step) และไม่มีการคำนวณซ้ำ (Iteration) ทำให้สามารถทำการจำลองแบบได้ ในช่วงเวลาที่ยาวนานบนพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่ได้ และสามารถลดข้อมูลที่เป็นรายละเอียดของหน้าตัดทางขวางของทางน้ำ โดยสมมุติให้ขนาดของทางน้ำสายหลักมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูความลาดเททางข้าง (Channel Side Slope) เป็น 2:1

สำหรับพื้นที่ทุ่งน้ำท่วม (Floodplain) แบบจำลองจะทำการสร้างขึ้น เมื่อปริมาณน้ำในทางน้ำมีความลึกมากกว่าความลึกทั้งหมดของลำน้ำ โดยจะกำหนดให้ความกว้างของทุ่งน้ำท่วมกว้าง เป็น 5 เท่าของความกว้างด้านบนของทางน้ำ และความลาดเททางข้างเป็น 4:1 ข้อมูลน้ำเข้าของทางน้ำประกอบด้วยความยาวของช่วงทางน้ำ ความลาดชันทางน้ำ ความลึกทางน้ำ ความกว้างทางน้ำด้านบน ความลาดเทของทุ่งน้ำท่วม ค่าสัมประสิทธิ์ Manning's n ของทางน้ำและทุ่งน้ำท่วม โดยแบบจำลอง SWAT สามารถทำการเตรียมข้อมูลน้ำเข้าพื้นฐานอย่างเช่น ความยาวลำน้ำ ความลาดเท ท้องน้ำ เป็นต้น ปริมาณน้ำไหลออกจากช่วงของลำน้ำหาได้จากสมการที่ 2.18 และ 2.19

$$O_i = SC (I_i + S_{i-1}) \quad (2.18)$$

เมื่อ	O_i	คือ	ปริมาณน้ำไหลออก (m^3)
	I_i	คือ	ปริมาณน้ำไหลเข้า (m^3)
	S_{i-1}	คือ	ปริมาณความจุของช่วงลำน้ำของวันก่อน (m^3)
	SC	คือ	ค่า Storage Coefficient สามารถประมาณค่าโดยใช้สมการ ดังนี้

$$SC = \frac{48}{2TT+24} \quad (2.19)$$

เมื่อ	TT	คือ	Travel Time (ชั่วโมง)
			การคำนวณค่า Travel Time โดยการแบ่งช่วงความยาวทางน้ำ จากอัตราเร็วของน้ำซึ่งค่า Travel time จะมีความสัมพันธ์กับการไหลแบบ Non-Linear ดังแสดงในสมการที่ 2.20

$$TT = X_1 q r^{x_2} \quad (2.20)$$

เมื่อ	X_1, X_2	คือ	ค่า Parameter ของแต่ละช่วงของทางน้ำเมื่อมีการไหลอยู่ในทางน้ำ
	qr	คือ	อัตราการไหล (m^3 / hr)

อัตราการไหลและอัตราเร็วของน้ำเฉลี่ย จะคำนวณโดยใช้สมการ Manning's Equation จะทำการคำนวณที่เต็มความลึกของทางน้ำ และที่ 0.1 ของความลึกของทางน้ำ ตามลำดับ โดยสมการอัตราการไหลสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.21

$$qr = \frac{A}{n} R^{2/3} \sqrt{S} \quad (2.21)$$

เมื่อ	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดการไหล (Flow Area)
	R	คือ	รัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic Radius)

7. การซึมของน้ำผิวดินลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Groundwater Recharge)

แบบจำลอง SWAT คำนวณการซึมลงสู่ชั้นน้ำบาดาล เมื่อปริมาณน้ำในดินมากกว่าความจุที่ดินเก็บกักได้ ซึ่งจะคำนวณโดยใช้สมการ Green-Ampt's Equation ดังสมการที่ 2.22 และ 2.23

$$Ws = (Sw - Fc) \cdot (1 - \exp(-\Delta t(K/Fc))) \quad (2.22)$$

$$Perc_i = (1 - \exp(-1/GW_D)) * Ws + \exp(-1/GW_D) * Perc_{i-1} \quad (2.23)$$

เมื่อ	Ws	คือ	ปริมาณน้ำส่วนเกินที่ดินไม่สามารถเก็บกักได้ (Water Seepage)
	Sw	คือ	ปริมาณน้ำในดิน (Soil Water)
	Fc	คือ	ความสามารถในการเก็บกักน้ำในดิน (Field Capacity)
	K	คือ	ความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้ (Hydraulic Conductivity)
	Δt	คือ	เวลา (time)
	Perc _i	คือ	ปริมาณการซึม (Percolation)
	GW _D	คือ	ความลึกของชั้นน้ำบาดาล (Groundwater Depth)

2.6 วิธีวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลอง

ในการศึกษาแบบจำลอง จำเป็นต้องมีการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง เนื่องจากเหตุผลต่างๆดังต่อไปนี้ คือ

1. เพื่อการประเมินความสามารถของแบบจำลอง ในการลอกเลียนแบบพฤติกรรมในการเกิดน้ำท่าของต้นน้ำในอดีต และการทำนายพฤติกรรมการเกิดน้ำท่าของต้นน้ำในอนาคต

2. เพื่อการประเมินผลสัมฤทธิ์ในการปรับปรุงแบบจำลอง โดยการปรับค่าพารามิเตอร์หรือโครงสร้างของแบบจำลอง เพื่อให้สามารถทำนายคุณลักษณะของต้นน้ำ ทั้งในเชิงพื้นที่และเวลา

3. เพื่อใช้เปรียบเทียบการจำลองที่กำลังศึกษา กับผลการศึกษาที่ทำมาก่อนหน้านั้น

กระบวนการในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง จะทำโดยการพิจารณาความสอดคล้องกันของค่าจากผลการจำลอง (Simulated Result) และค่าสังเกตที่ได้มีการบันทึกไว้ หรือค่าที่เกิดขึ้นจริง (Observations) ซึ่งมักจะทำได้โดยการตรวจสอบกราฟที่พล็อตเปรียบเทียบค่าทั้งสองด้วย และการคำนวณค่าความผิดพลาดระหว่างค่าจากแบบจำลองและค่าสังเกตที่เกิดขึ้นจริง โดยใช้เกณฑ์การประเมินเชิงประสิทธิภาพ เช่น สัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) และเกณฑ์อื่นๆ เช่น รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE), Mean Absolute Error (MAE) เป็นต้น

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ SWAT ในครั้งนี้ ได้นำเอาเกณฑ์การประเมินความแม่นยำของแบบจำลองมาทั้งหมด 3 เกณฑ์ โดยประกอบด้วย สัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) โดยรายละเอียดของเกณฑ์การประเมินเป็นดังต่อไปนี้

2.6.1 สัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2)

สัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ คือ การเอาค่าของสัมประสิทธิ์สัมพันธ์มายกกำลังสองดังแสดงในสมการที่ 2.22 ใช้เพื่อแสดงความแปรผันที่เกิดขึ้นกับตัวแปร Y มีผลเนื่องมาจากตัวแปร X

$$R^2 = \frac{\sum(Y-\bar{Y})^2}{\sum(Y-\bar{Y})^2} \quad (2.22)$$

เมื่อ	R^2	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ
	\hat{Y}	คือ	ค่าคาดคะเนจากแบบจำลอง (ลบ.ม.)
	Y	คือ	ค่าสังเกต (ลบ.ม.)
	\bar{Y}	คือ	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำท่าจากการตรวจวัด (ลบ.ม.)

ค่าที่คำนวณได้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีที่ค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปร Y มีอิทธิพลต่อตัวแปร \hat{Y} อย่างมาก หมายความว่า สมการการประมาณค่า จะมีความเหมาะสมที่จะ

นำไปใช้งานได้มาก และในกรณีที่ R^2 มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า ตัวแปร Y มีอิทธิพลต่อตัวแปร \hat{Y} น้อยมาก หมายความว่า สมการประมาณค่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้น้อย

2.6.2 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) จาก (Nash & Sutcliffe, 1970) ได้ให้ความหมายไว้ว่าเป็น ดรรชนีที่ใช้ในการบอกค่าความแม่นยำของแบบจำลองหรือประสิทธิภาพ-ประสิทธิผลของแบบจำลองในการคาดคะเนค่าที่ต้องการ สูตรการคำนวณหาค่า NSE แสดงอยู่ในสมการที่ 2.23

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (2.23)$$

เมื่อ Y_i คือ ค่าสังเกตที่ i เมื่อ i มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง n (ลูกบาศก์เมตร)

\hat{Y}_i คือ ค่าคาดคะเนจากแบบจำลองของค่า Y_i (ลูกบาศก์เมตร)

\bar{Y}_i คือ ค่าเฉลี่ยของ Y_i (ลูกบาศก์เมตร)

NSE จะมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ซึ่งสามารถแปลความหมายค่า NSE ได้ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 การแปลความหมายค่า NSE

ค่า NSE	การแปลความหมายของความแม่นยำในการคาดคะเน
1	แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยไม่มีผิดพลาด
> 0 ถึง < 1	แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยมีความแม่นยำมากกว่าการใช้ค่าเฉลี่ย
0	แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยมีความแม่นยำไม่ต่างจากการคาดคะเนโดยใช้ค่าเฉลี่ย
< 0	แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยมีความแม่นยำน้อยกว่าการคาดคะเนโดยใช้ค่าเฉลี่ย
0.36 - 0.75	แบบจำลองสามารถคาดคะเนได้แม่นยำดี
≥ 0.75	แบบจำลองสามารถคาดคะเนได้แม่นยำดีมาก

2.6.3 รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)

รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) เป็นค่าที่บอกถึงค่าความแม่นยำของแบบจำลอง หรือประสิทธิภาพ-ประสิทธิผลของแบบจำลอง ในการคาดคะเนค่าที่ต้องการ สูตรการคำนวณหาค่า RMSE แสดงอยู่ในสมการที่ 2.24

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (2.24)$$

เมื่อ Y_i คือ ค่าสังเกตที่ i เมื่อ i มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง n (ลูกบาศก์เมตร)
 \hat{Y}_i คือ ค่าคาดคะเนจากแบบจำลองของค่า Y_i (ลูกบาศก์เมตร)
 n คือ จำนวนของชุดข้อมูล

ค่าของ RMSE ที่ได้ออกมานั้น ยังมีค่าน้อยเท่าไร ยิ่งแสดงให้เห็นว่าค่า \hat{Y}_i ที่ได้จากแบบจำลอง มีความแม่นยำมากขึ้นเท่านั้น

2.7 แบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล (Groundwater Flow Model)

แบบจำลอง GMS (Groundwater Modeling System) เป็นแบบจำลองที่ทำหน้าที่จัดการและเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างผู้ใช้กับแบบจำลอง MODFLOW และช่วยในการแสดงผลผลการคำนวณในแบบรูปภาพ

MODFLOW เป็นแบบจำลองสภาพการไหลของน้ำบาดาลที่พัฒนาขึ้นโดย United State Geological Survey (USGS) โดยสามารถจำลองการไหลได้ทั้งแบบ 1 มิติ 2 มิติ กึ่ง 3 มิติ และ 3 มิติ และจำลองได้ทั้งสภาวะการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัว สำหรับกรณีชั้นน้ำบาดาลไร้แรงดัน ชั้นน้ำบาดาลมีความดัน รวมทั้งชั้นน้ำบาดาลแบบผสม และสามารถคำนวณชุดข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้ เช่น อัตราการสูบน้ำ การเติมน้ำ การคายระเหย การระบายน้ำ และความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในทางน้ำกับน้ำบาดาล โดยในตัวโปรแกรมหลักของ MODFLOW ประกอบด้วยโมดูลเล็กๆหลายโมดูล ซึ่งแต่ละโมดูลถูกเรียกว่าชุดการคำนวณ สามารถจัดกลุ่มของชุดการคำนวณได้ 3 กลุ่ม คือ

1. ชุดการคำนวณองค์ประกอบของการไหล (Flow Component Packages) ได้แก่ ชุดการคำนวณ Block Centered Flow, Well, Recharge, Drain, Evapotranspiration และ General Head Boundary

2. ชุดการคำนวณควายาวของช่วงเวลา (Stress Package) ได้แก่ ชุดการคำนวณ Well, Recharge, Drain, River, Evapotranspiration และ General Head Boundary
3. ชุดการคำนวณการแก้สมการ (Solver Packages) ได้แก่ ชุดการคำนวณ Strongly Implicit Procedure, Slice Successive Over Relaxation และ PCG ซึ่งแต่ละชุดการคำนวณจะมีขั้นตอนการทำงาน (Procedures) ดังตารางที่ 2-2

โปรแกรม MODFLOW ถูกออกแบบมาสำหรับจำลองระบบชั้นน้ำบาดาลที่มีลักษณะสอดคล้องตามเงื่อนไขต่อไปนี้

- เป็นชั้นน้ำที่อิ่มตัว
- การไหลเป็นไปตามกฎของดาร์ซี
- ความหนาแน่นของน้ำบาดาลคงที่
- การกระจายตัวลักษณะวัสดุด้านชลศาสตร์ในแนวราบของระบบต้องไม่มีความแปรปรวนมากนัก
- สมการที่ใช้ในการคำนวณใน MODFLOW คือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.25)$$

เมื่อ	K_{xx} , K_{yy} และ K_{zz} คือ	ค่าความนำทางชลศาสตร์ตามแนวแกน x, y และ z ($L T^{-1}$)
	h คือ	ระดับน้ำ (L)
	W คือ	Volumetric Flux ต่อหน่วยปริมาตร แทน Source หรือ Sink ถ้ามีค่าเป็น + หมายถึง มีการเติมน้ำ มีค่าเป็น - คือ มีการสูบน้ำออก (T^{-1})
	S_s คือ	ค่าความสามารถในการให้น้ำของชั้นหินให้น้ำ (L^{-1})
	t คือ	เวลา (T)

โดยในแบบจำลอง MODFLOW ได้มีการจัดเตรียมชุดคำสั่งต่างๆ ไว้ สำหรับในการคำนวณและจำลองภาพการไหลของน้ำบาดาลดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ชุดคำสั่งการคำนวณภายในแบบจำลอง MODFLOW และข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ชื่อชุดการคำนวณ	หน้าที่	ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ
Basic	จัดการพื้นฐานของแบบจำลอง เช่น การกำหนดขอบเขต ระบบกริด ช่วงเวลาในการคำนวณ, เงื่อนไขตั้งต้น และรูปแบบการนำเสนอผลลัพธ์	จำนวนชั้นน้ำหลัก และแถวของระบบกริด ค่าระดับน้ำเริ่มต้น จำนวน stress period จำนวนช่วงเวลา และขอบเขต
Block Centered Flow	กำหนดค่าพารามิเตอร์ ในการคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ของการไหลในตัวกลางรูพรุน ใน แต่ละ กริด เซลล์ เช่น ค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ของชั้นน้ำ	สภาพการจำลองชนิดของชั้นน้ำ ค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำ สัมประสิทธิ์การกักเก็บ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวตั้ง
Well	จัดการข้อมูลการสูบน้ำ ที่ตั้งบ่อน้ำบาดาล	จำนวน ตำแหน่ง อัตราการสูบน้ำ
Recharge	จัดการข้อมูลการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล	พื้นที่การเติมน้ำ อัตราการเติมน้ำ
River	จัดการข้อมูลทางน้ำ และระดับในทางน้ำ ซึ่งมีผลต่อการไหลของน้ำบาดาล	ตำแหน่ง รูปร่างของทางน้ำ ระดับน้ำ และคุณสมบัติของวัสดุที่ท้องน้ำ
Drain	จัดการข้อมูลการระบายน้ำ	-
Evapotranspiration	จัดการข้อมูลการคายระเหย	-
General Head Boundary	กำหนดระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำต่างๆ	ค่าระดับน้ำบาดาลในชั้นต่างๆ
Strongly Implicit Procedure	ควบคุมระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแก้ปัญหา ระบบสมการ Finite Different โดยการคำนวณซ้ำแบบ Implicit	ค่าเงื่อนไขในการคำนวณซ้ำในแต่ละช่วงเวลา และรายละเอียดของการคำนวณ
Slice Successive Over Relaxation	ควบคุมระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแก้ปัญหา ระบบสมการ Finite Different โดยการคำนวณซ้ำแบบ Slice Successive Over Relaxation	-

2.7.1 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง MODFLOW

คาบเวลาของแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็นลำดับของช่วงเวลาที่น่าสนใจในการคำนวณเรียกว่า Stress Period แต่ละ Stress Period อาจแบ่งออกเป็นลำดับของ Time Step ซึ่งเป็นช่วงเวลาย่อยของ Stress Period ระบบของสมการ Finite Difference ของสมการการไหลจะถูกสร้างขึ้น และแก้สมการในแต่ละโหนด ที่จุดสุดท้ายของแต่ละ Time Step และใช้วิธีการหาค่าตอบซ้ำในการแก้สมการเพื่อหาค่าระดับน้ำ สำหรับแต่ละ Time Step และในสภาพจำลองหนึ่ง จะมี 3 Loop อยู่ข้างในขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลัก ประกอบด้วย

- Define Procedure เป็นการกำหนดสภาพปัญหาที่จำลอง เช่น ขนาดของโมเดล ชนิดของแบบจำลอง (Transient หรือ Steady-State) จำนวนของ Stress Period แนวทางเลือกทางอุทกวิทยา และวิธีการแก้ไขปัญหาที่ต้องการ
- Allocate Procedure เป็นการจัดสรรตำแหน่งของหน่วยความจำ
- Read and Prepare Procedure เป็นส่วนที่ข้อมูลทั้งหมดที่ไม่ใช่ฟังก์ชันของเวลา ซึ่งเป็นข้อมูลค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ระดับน้ำเริ่มต้น (Initial Head) ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Transmissivity) สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity) ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกัก (Specific Storage) ระดับผิวบนและผิวล่างของชั้นน้ำต่างๆ และพารามิเตอร์จำเป็นในวิธีการแก้ปัญหา และจัดเตรียมข้อมูลสำหรับขั้นตอนต่อไป
- Stress Procedure เป็นการกำหนดจำนวนความยาวของแต่ละช่วงระยะเวลาในการคำนวณในแต่ละ Stress Period และข้อมูลในการคำนวณความยาวของแต่ละช่วงจะถูกอ่านค่า
- Read and Prepare Procedure เป็นการอ่านข้อมูลที่เกี่ยวกับ Stress Period เช่น อัตราการสูบน้ำ และพื้นที่เติมน้ำจะถูกอ่านและเตรียมไว้ จากนั้นจึงเข้าสู่ Time-Step Loop
- Advance Procedure ความยาวของช่วงระยะเวลาในการคำนวณจะถูกคำนวณและค่าระดับน้ำของจุดเริ่มต้นจะถูกใช้ในการเริ่มคำนวณ Iteration Loop
- Formulate Procedure เป็นการหาค่า Conductance และสัมประสิทธิ์ต่างๆ สำหรับแต่ละโหนดที่จำเป็นต้องใช้ในสมการการไหล
- Approximate Procedure ซึ่งประมาณค่าตอบของสมการเชิงเส้นของค่าระดับน้ำ การทำซ้ำและต่อเนื่องไปจนกระทั่งทำไปถึงค่าสูงสุดของการคำนวณซ้ำที่ยอมให้ที่จุดสุดท้ายของ Iteration Loop หรือคำนวณจนถึงค่าผิดพลาดที่กำหนด

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษารั้งนี้ ได้รวบรวมงานวิจัยที่มีความสอดคล้องกับการศึกษา เช่น งานวิจัยที่ใช้เทคนิคไอโซโทปเสถียรศึกษาความสัมพันธ์ของน้ำจากแหล่งต่างๆ งานวิจัยที่ใช้แบบจำลอง SWAT ประเมินปริมาณน้ำในระบบ และงานวิจัยที่ใช้แบบจำลอง MODFLOW ศึกษาสภาพการไหลและระบบของน้ำบาดาล ดังต่อไปนี้

2.8.1 งานวิจัยที่ใช้เทคนิคไอโซโทปเสถียรศึกษาความสัมพันธ์ของน้ำจากแหล่งต่างๆ

ในการศึกษารั้งนี้ ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่ใช้เทคนิคไอโซโทปเสถียร เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของน้ำจากแหล่งต่างๆ ที่มีการศึกษาในอดีต ทั้งจากต่างประเทศและภายในประเทศ ดังเช่นประเทศโมร็อกโค นักวิจัยชาวโมร็อกโค (Bouchaou et al., 2008) ได้ใช้ไอโซโทปเสถียรศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำในแม่น้ำ Souss ช่วงปลายน้ำกับน้ำบาดาล ประเทศโมร็อกโค (Morocco) จากการเปรียบเทียบขององค์ประกอบของ δD และ $\delta^{18}O$ โดยทำการศึกษาในปี ค.ศ. 2008 พบว่ามีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ทั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง อีกทั้งยังศึกษาปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) และปริมาณการเติมน้ำ (Recharge) โดยใช้สมการสมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทป (Isotopes Mass Balance Equation) สรุปได้ว่า แม่น้ำ Souss มีปริมาณการเติมน้ำร้อยละ 28 ในฤดูน้ำแล้ง และร้อยละ 72 ในฤดูน้ำหลาก และในปีเดียวกัน (Gu et al., 2008) ได้ทำการศึกษารังการไหลของน้ำบาดาลสู่แม่น้ำในลุ่มน้ำ Sonoita ในรัฐอริโซนา (Arizona) โดยใช้ไอโซโทปของซัลเฟต (S,O) กล่าวว่า ในปกติจะใช้ไอโซโทปของออกซิเจน และไฮโดรเจนในการวิเคราะห์แหล่งที่มาของน้ำ ลุ่มน้ำ Sonoita มีปริมาณไอโซโทปของออกซิเจนและไฮโดรเจนไม่มากนัก อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์หาแหล่งที่มาของน้ำบาดาล ชั้นหินในลุ่มน้ำมีส่วนประกอบของซัลเฟต ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้ไอโซโทปของซัลเฟต (S,O) เพื่อเปรียบเทียบแหล่งที่มาของน้ำบาดาลที่ไหลออกสู่แม่น้ำ สรุปว่า ในลุ่มน้ำ Sonoita มีแหล่งกักเก็บน้ำบาดาล 3 แหล่ง และมีปริมาณการไหลลงสู่แม่น้ำร้อยละ 50 ร้อยละ 25 ร้อยละ 25 ตามลำดับ โดยวิเคราะห์จากสมการสมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทป (Isotope(S-34) Mass Balance) และในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ในต่างประเทศได้นำเทคนิคไอโซโทปเสถียร นอกเหนือจาก δD และ $\delta^{18}O$ มาใช้ในการศึกษาด้านอุทกวิทยามากขึ้น ดังเช่น นักวิจัยชาวแคนาดา (Meredith & Kuzara, 2012) ทำการศึกษาลักษณะและปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ของแม่น้ำ Montana โดยใช้ไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน (C-13) พบว่าปริมาณสัดส่วนไอโซโทปของคาร์บอน (C-13) มีปริมาณมากขึ้นจากต้นน้ำไปท้ายน้ำ ตามระยะที่ใกล้มหาสมุทร เหมือนกับสัดส่วนไอโซโทปของไฮโดรเจนและออกซิเจนที่มีการศึกษาก่อนหน้านี้ จากการศึกษาปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) โดยใช้ไอโซโทปคาร์บอน

(C-13) สรุปได้ว่า ปริมาณของน้ำบาดาลในแม่น้ำ แปรผันตรงกับอุณหภูมิของน้ำในแม่น้ำ Montana และจากการวิเคราะห์โดยใช้สมการสมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทป (Isotope (C-13) Mass Balance) พบว่าแม่น้ำ Montana มีปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ร้อยละ 10 ของการไหลในแม่น้ำ ทั้งหมด ส่วนในประเทศไทยนั้น (Putthividhya, 2014) ทำการศึกษาในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน โดยใช้วิธีสมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทป (Stable Isotope Mass Balance) ของดิวทีเรียมและ ออกซิเจน-18 พบว่า น้ำบาดาลมีแหล่งกำเนิดมาจาก น้ำผิวดินร้อยละ 54 และน้ำฝนร้อยละ 46 มี ปริมาณการเติมน้ำ (Recharge) ประมาณร้อยละ 71.4 ในฤดูน้ำหลาก และร้อยละ 28.6 ในฤดูน้ำแล้ง จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่า ไอโซโทปเสถียรของน้ำสามารถทำให้เข้าใจ พฤติกรรมทางชลศาสตร์ และความสัมพันธ์ของแหล่งน้ำแหล่งต่างๆ มากขึ้น ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ จึงนำเทคนิคสมดุลมวลไอโซโทป เพื่อศึกษาความเชื่อมโยงทางชลศาสตร์ระหว่าง น้ำผิวดิน น้ำ ฝน น้ำ บาดาล ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

2.8.2 งานวิจัยที่ใช้แบบจำลอง SWAT ในการศึกษาวิจัย

แบบจำลอง SWAT ถูกพัฒนาให้รองรับการศึกษาแบบจำลองการจัดการลุ่มน้ำและ คุณภาพน้ำที่หลากหลาย โดยสามารถใช้ในการประเมินแผนการบริหารจัดการลุ่มน้ำได้ทั้งในปัจจุบัน และในอนาคต ซึ่งจากการรวบรวมเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องแล้ว จะเห็นได้ว่า แบบจำลอง SWAT มีความละเอียด และสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ที่ส่งผล ต่อการเกิดปริมาณน้ำท่า ดังเช่นในประเทศสหรัฐอเมริกา (Cao, Bowden, Davie, & Fenemor, 2006) ได้จำลองผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อวิกฤตการณ์ภัยแล้งน้ำในลุ่มน้ำ Motueka ประเทศนิวซีแลนด์ โดยใช้แบบจำลอง SWAT เป็นเครื่องมือ หลังจากเปรียบเทียบและสอบ ทานแบบจำลองแล้ว ได้เพิ่ม 2 แผนการศึกษา คือ การจำลองการใช้ที่ดินในอดีต และการจำลองการ ปลุกต้นสน ให้เต็มศักยภาพของพื้นที่ทั้ง 2 แผนการศึกษา เพื่อประเมินผลกระทบของการ เปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อผลผลิตน้ำท่ารวมการไหลของน้ำบาดาล และการไหลของน้ำท่าผิวดิน ผล การศึกษาแสดงให้เห็นว่า ผลผลิตน้ำท่ารวมน้ำท่าผิวดิน และน้ำบาดาลรายปี มีปริมาณลดลง พอประมาณทั้ง 2 แผนการศึกษา เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ที่ดินจริงในปัจจุบัน สมดุลน้ำรายปีทั้งลุ่ม น้ำสำหรับการจำลองการปลุกต้นสนเต็มศักยภาพของพื้นที่ไม่มีความแตกต่างจากการจำลองการใช้ ที่ดินในอดีตเท่าไรนัก อย่างไรก็ตาม มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดในแต่ละลุ่มน้ำสาขาที่มีความสัมพันธ์ กับการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินของพื้นที่นั้นๆ ปริมาณการไหลต่ำสุดทั้ง 2 แผนการศึกษา ต่ำกว่า ปริมาณการไหลต่ำสุดของการใช้ที่ดินในปัจจุบัน และในปีถัดมา (Jiang et al., 2008) ได้ศึกษา ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสิ่งคลุมดินต่อปริมาณน้ำท่าและตะกอนในลุ่มน้ำ Cedar Creek แม่น้ำ

ST. Joseph ที่ Indiana ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้แบบจำลอง SWAT เป็นเครื่องมือในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่า ตะกอน และสิ่งปกคลุมดินในกลุ่มน้ำ Cedar Creek ซึ่งลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินส่วนใหญ่เป็นพื้นที่การเกษตร ป่าไม้ และทุ่งหญ้าหรือพื้นที่โครงการอนุรักษ์ (CRP) มีประมาณร้อยละ 90 ของพื้นที่ในภูมิภาค ยิ่งไปกว่านั้นการใช้ที่ดินได้มีการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงปี ค.ศ. 2000 ถึง ค.ศ. 2004 ผลการศึกษา พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าและตะกอนมีความเชื่อมโยงกับพื้นที่การเพาะปลูก โดยเฉพาะข้าวโพดและถั่วเหลือง ตะกอนมีความอ่อนไหวมากกว่าปริมาณน้ำท่ากรณีมีการเปลี่ยนแปลงสิ่งคลุมดิน การมีปริมาณน้ำฝนมากไม่ได้หมายความว่าจะมีปริมาณน้ำท่ามากตามไปด้วย เพราะว่าสิ่งคลุมดินที่มีความแตกต่างกัน ทำให้สัมประสิทธิ์น้ำท่าเปลี่ยนแปลงไป และสิ่งปกคลุมดินประเภทข้าว ถั่ว และข้าวโพด ที่เป็นการใช้ที่ดินหลัก ได้ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่า และตะกอนในกลุ่มน้ำ Cedar Creek

และมีการวิจัยในประเทศไทยเอง พบว่า (วงศาศรี., 2554) สรุปไว้ว่าแบบจำลอง SWAT เป็นแบบจำลองที่ใช้ประเมินปริมาณน้ำท่าในกลุ่มน้ำ เมื่อได้แบบจำลองที่มีค่าพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงในพื้นที่ และแบบจำลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือแล้ว สามารถนำแบบจำลองที่ได้ ไปประยุกต์ใช้โดยการสร้างสถานการณ์จำลองต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าในกลุ่มน้ำ เช่น การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน การสร้างอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางเลือกในการบริหารจัดการน้ำต่อไป และยังพบว่า งานวิจัยหลายฉบับ มีการนำแบบจำลอง SWAT เพื่อศึกษาวิจัยเกี่ยวกับทรัพยากรน้ำบาดาลเช่นกัน โดย (Luo, Arnold, Allen, & Chen, 2012) ได้จำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่เติมสู่ชั้นน้ำบาดาล (Recharge) และปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) จากการสร้างอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเทือกเขาเทียนชาน (Tianshan Mountains) โดยใช้แบบจำลอง SWAT พบว่า การสร้างอ่างเก็บน้ำส่งผลต่อปริมาณของการไหลพื้นฐานในพื้นที่ โดยการสร้างอ่างเก็บน้ำ 1 แห่ง จะมีปริมาณการไหลพื้นฐานมากกว่าการสร้างอ่างเก็บน้ำ 2 แห่ง แต่มีปริมาณการเติมสู่ชั้นน้ำบาดาลน้อยกว่า จากการศึกษาดังกล่าวยังไม่สามารถแสดงผลได้ชัดเจนมากนัก เนื่องจากหลีกเลี่ยงการประมวลผลที่ซ้ำ จึงไม่ได้นำเข้าข้อมูลชุดดิน (Soil Type) งานวิจัยนี้ได้เสนอแนะให้พิจารณาข้อมูลของดิน (Soil Type) ของพื้นที่ประกอบด้วย เพื่อให้ปริมาณการเติมสู่ชั้นน้ำบาดาลและปริมาณการไหลพื้นฐานมีความถูกต้องมากขึ้น อีกทั้งในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง SWAT ยังพบว่า นักวิจัยหลายท่านนำมาประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ปัญหาขึ้นน้ำ และศึกษาปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ดังเช่น งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ปัญหาขึ้นน้ำ (กิมลา., 2556) ได้ประยุกต์ใช้ผลจากแบบจำลอง SWAT ในการวิเคราะห์ปัญหาขึ้นน้ำของกลุ่มน้ำเซโดน สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว โดยใช้ข้อมูล 10 ปี ระหว่างปี ค.ศ. 2001 ถึงปี ค.ศ. 2010 จากการจำลอง โดยทำการสรุปผลตามหลักการของ

สมมูลน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย และนำไปทำการวิเคราะห์บัญชีน้ำรายปีของลุ่มน้ำ แบบจำลอง SWAT สามารถแยกองค์ประกอบต่างๆ ของสมมูลน้ำในแต่ละลุ่มน้ำย่อยได้ละเอียดถึงระดับ HRUs ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณน้ำเข้าพื้นที่ลุ่มน้ำ ปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากการใช้น้ำของพืช และปริมาณน้ำที่ไหลออกจากลุ่มน้ำ ผลการจำลองในแต่ละกรณีพิจารณาที่ได้จากการประเมินด้วยแบบจำลอง สามารถที่จะวิเคราะห์บัญชีน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำได้ ช่วยให้การแสดงผลลัพธ์ทางกายภาพของลุ่มน้ำได้อย่างชัดเจน และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่แบบจำลอง SWAT ยังมีข้อจำกัดในการสรุปผล โดยแบบจำลองประเมินองค์ประกอบต่าง ๆ ของปริมาณน้ำเป็นรายวัน แต่การสรุปผลลัพธ์ของ HRUs เป็นข้อมูลแบบเฉลี่ยรายปี ดังนั้น จึงมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์บัญชี แบบรายเดือน และแบบรายฤดูกาลของลุ่มน้ำเซโดน นอกจากนี้ยังพบว่า มีงานวิจัยที่ศึกษาอัตราการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลด้วย ดังเช่น (Jin, Shimizu, Onodera, Saito, & Matsumori, 2015) ได้ทำการประเมินผลกระทบของภัยแล้งที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Recharge) ในพื้นที่ลุ่มน้ำ IKS โดยใช้แบบจำลอง SWAT สอบเทียบ (Validation) และประเมินระบบน้ำบาดาลโดยใช้ (Hydrus) จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำฝนที่มีความผันผวนมีอิทธิพลต่อปริมาณการไหลเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล โดยมีปริมาณเฉลี่ยร้อยละ 33 ของปริมาณน้ำฝน และมีอิทธิพลต่อระดับน้ำบาดาลด้วย จากการศึกษาดังกล่าวได้เสนอแนะว่า แบบจำลอง Hydrus-1D มีข้อจำกัดในการประเมินการไหลของชั้นน้ำบาดาลในแนวราบ ในการศึกษาครั้งต่อไปควรเลือกแบบจำลองที่สามารถจำลองได้ 2 มิติ หรือ 3 มิติ เพื่อสามารถประเมินการไหลของน้ำบาดาลได้ดียิ่งขึ้น จากการรวบรวมงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น ที่ใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า SWAT จึงสามารถจำลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำฝน - น้ำท่า และประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อหาปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับต้นได้ ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงได้จัดทำแบบจำลอง SWAT เพื่อศึกษาปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับต้น และปริมาณการไหลพื้นฐาน ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

2.8.3 งานวิจัยที่มีการศึกษาน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านทรัพยากรน้ำบาดาล พบว่าในจังหวัดสุโขทัย มีการศึกษาเพื่อประเมินปริมาณการสูบน้ำปลอดภัย ดังเช่น (ชัยสายัณห์., 2545) ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ข้อมูลของโครงการน้ำบาดาลสุโขทัย ในการพัฒนาแบบจำลองเดิม (SGDP) และการสร้างแบบจำลองใหม่โดยใช้โปรแกรม MODFLOW โดยมีข้อแตกต่างกัน คือ แบบจำลองเดิมไม่ได้แบ่งแยกชั้นน้ำบาดาลต่างๆ ชัดเจนเหมือนแบบจำลองที่สร้างใหม่ แบบจำลองเดิมมีการกำหนดค่าอัตราการเติมน้ำ (Recharge) เท่ากับร้อยละ 12 ของปริมาณน้ำฝน และมีค่าเดียวกันทั้งพื้นที่แบบจำลอง ในขณะที่แบบจำลองใหม่ได้กำหนดให้มีค่าอัตราการเติมน้ำ (Recharge) เท่ากับ 12 %

เฉพาะในส่วนที่มีการสูบน้ำมากบริเวณโซนกลาง และมีค่าลดลงมาเป็น 8% และ 3% ในบริเวณรอบนอกโดยค่าอัตราการเติมน้ำ (Recharge) แปรผันตามค่าความลาดชัน (Hydraulic Gradient) ที่เกิดจากการสูบน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity, K) ผลจากการจำลองระดับน้ำในแบบจำลองเดิมและแบบจำลองใหม่มีค่าส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แต่ในแบบจำลองใหม่มีการเพิ่มเติมช่วงข้อมูลที่ยาวขึ้น และทำการสอบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่มีในปัจจุบันของระบบชั้นน้ำบาดาล นอกจากนี้แบบจำลองใหม่ยังมีความยืดหยุ่นและสะดวกในการเพิ่มเติมหรือปรับแก้ข้อมูล จึงตอบสนองต่อการวิเคราะห์เพิ่มเติมในอนาคตซึ่งทำได้สะดวกกว่าแบบจำลองเดิม เพราะฉะนั้นแบบจำลอง MODFLOW จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานในอนาคตมากกว่า การกำหนดอัตราการสูบน้ำเป็นกรณีต่างๆ คือ 35, 40, 45, 50, 55 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ พบว่าในแต่ละกรณีค่าการแกว่งของกราฟระดับน้ำมีช่วงการขึ้นลงของกราฟค่อนข้างคงที่ เนื่องจากใช้อัตราการสูบน้ำและข้อมูลอัตราการเติมน้ำ (Recharge) คงที่ตลอด 10 ปี แต่ระดับของการแกว่งของกราฟจะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการสูบน้ำที่สูงขึ้น กราฟระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ติดแม่น้ำนั้น ระดับน้ำค่อนข้างคงที่ตลอดทุกกรณี ส่วนแนวโน้มการลดลงของกราฟระดับน้ำซึ่งเป็นผลมาจากการสูบน้ำขึ้นมาใช้ในปริมาณที่สูงกว่าค่า Recharge เริ่มมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในกรณีที่ 2 (สูบน้ำ 40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี) คือประมาณ 1 เมตร ในช่วง 10 ปี ดังนั้น ปริมาณการสูบน้ำที่ปลอดภัย (Safe Yield) ควรอยู่ในช่วง 35-40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้เป็นจำนวนมาก กรมทรัพยากรน้ำบาดาลจึงทำการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล และในครั้งนั้นเอง (โกษาแสง., 2555) ได้ศึกษาการจำลองการไหลของน้ำบาดาลในโครงการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล อำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดสุโขทัย โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW V.4.2 สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ทิศทางการไหลของน้ำที่ทำการเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาล ทั้งในชั้นน้ำบาดาลตะกอนตะพักกลุ่มน้ำชั้นต่ำ (Qlt) และในชั้นน้ำตะกอนตะพักกลุ่มน้ำชั้นสูง (Qht) มีทิศทางการไหลไปในทิศใต้และทิศตะวันออกเฉียงใต้ เช่นเดียวกับแบบจำลองที่ใช้ทำการเปรียบเทียบ

2) สมดุลน้ำบาดาลในสภาวะปกติ และในกรณีทำการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Artificial Recharge) จากแบบจำลองในรอบ 1 ปี (พ.ศ. 2553) พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของทั้งสองเหตุการณ์ (% Discrepancy) มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.50 และร้อยละ 0.56 ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่า ในการอัดน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในรอบ 1 ปี ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาเพียงเล็กน้อย

3) การจำลองเพื่อหาศักยภาพของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ระยะเวลา 20 ปี ติดต่อกันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 – พ.ศ. 2572 ผลการจำลองพบว่า พื้นที่ศึกษามีปริมาณการสูบน้ำที่ปลอดภัย สามารถสูบน้ำ

ได้ประมาณ 134,385 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในเวลาดังกล่าวมีการใช้น้ำบาดาลประมาณ 24,627 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือร้อยละ 18 ของศักยภาพน้ำบาดาลที่มี ดังนั้นสามารถพัฒนาเพิ่มขึ้นได้อีกประมาณ 109,758 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวข้างต้น เป็นการศึกษาวิจัยในพื้นที่โครงการศึกษาการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ซึ่งมีพื้นที่ศึกษาประมาณ 225 ตารางกิโลเมตร เท่านั้น ซึ่งไม่ได้ครอบคลุมทั้งพื้นที่จังหวัดสุโขทัย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวข้างต้น ถือว่ามีประโยชน์อย่างมากสำหรับการครั้งนี้ ที่จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาครอบคลุมทั้งจังหวัดสุโขทัย เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย



บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

บทนี้ได้อธิบายวิธีการดำเนินงานวิจัยเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังนี้

1. เพื่อศึกษาความเชื่อมโยงทางชลศาสตร์ระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน
2. เพื่อสร้างแบบจำลองการประเมินปริมาณน้ำผิวดินและปริมาณน้ำที่เติมลงสู่ชั้นน้ำบาดาล
3. เพื่อสร้างแบบจำลองควบน้ำผิวดิน-น้ำบาดาล จำลองระดับน้ำและลักษณะการไหลของน้ำบาดาล
4. เพื่อประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา

โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.1 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ เลือกจังหวัดสุโขทัย เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีการใช้น้ำบาดาลปริมาณมาก และประสบปัญหาการลดระดับของน้ำบาดาลระดับตื้น อีกทั้งจังหวัดสุโขทัยได้มีการเก็บตัวอย่างน้ำ เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเดิมที่จะสนับสนุนการศึกษานี้ โดยมีการเก็บข้อมูลทั่วไป ดังต่อไปนี้

3.1.2 จังหวัดสุโขทัย

1) ขนาดและที่ตั้ง

จังหวัดสุโขทัยตั้งอยู่ภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย ห่างจากกรุงเทพมหานคร ตามระยะทางหลวงแผ่นดินประมาณ 440 กิโลเมตร มีเนื้อที่ประมาณ 6,596 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 4,122,557 ไร่

2) อาณาเขต

จังหวัดสุโขทัยมีอาณาเขตติดต่อกับจังหวัดใกล้เคียง ดังนี้

- ทิศเหนือ เขตอำเภอสรีลักษ์นาลัย ติดต่อกับ อำเภอวังชัน อำเภอสองเม่น จังหวัดแพร่ และอำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์
- ทิศใต้ เขตอำเภอสรีมาศ และอำเภอกงไกรลาศ ติดต่อกับ อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร และอำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก

- ทิศตะวันออก เขตอำเภอกงไกรลาศ อำเภอศรีสำโรง และอำเภอสวรรคโลก ติดต่อกับอำเภอพรหมพิราม อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก และอำเภอพิชัย จังหวัดอุตรดิตถ์
- ทิศตะวันตก เขตอำเภอบ้านด่านลานหอย และอำเภอทุ่งเสลี่ยม ติดต่อกับอำเภอเมืองตาก อำเภอบ้านตาก จังหวัดตาก และอำเภอเถิน จังหวัดลำปาง

3) สภาพภูมิประเทศ

จังหวัดสุโขทัยมีพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่ราบลุ่ม มีแม่น้ำยมไหลผ่านเป็นระยะทางประมาณ 170 กิโลเมตร พื้นที่ตอนเหนือเป็นภูเขาสูงต่อเนื่องเป็นแนวยาวมาทางด้านตะวันตก พื้นที่ตอนกลางเป็นที่ราบลุ่มและตอนใต้เป็นที่ราบสูง ยอดเขาสูงสุดคือ เขาหลวง อยู่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 1,185 เมตร พื้นที่จะค่อย ๆ ลาดเทลงมาทางตอนใต้กลายเป็นที่ราบที่มีแม่น้ำยมไหลผ่านตอนกลางของจังหวัด โดยลักษณะภูมิประเทศแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

- เทือกเขา อยู่เขตด้านเหนือและตะวันตกของจังหวัด พาดผ่านจากอำเภอศรีสัชชนาลัย อำเภอทุ่งเสลี่ยม อำเภอบ้านด่านลานหอย จนถึงอำเภอคีรีมาศ รวมพื้นที่ประมาณร้อยละ 33 ของพื้นที่จังหวัด
- ที่ราบเชิงเขา เป็นที่สูงเชิงเขาด้านเหนือและตะวันตกในเขตอำเภอศรีสัชชนาลัย อำเภอทุ่งเสลี่ยม อำเภอศรีสำโรง (เฉพาะตำบลนาขุนไกร) อำเภอบ้านด่านลานหอย และอำเภอคีรีมาศ มีความสูงของระดับผิวดินตั้งแต่ 60 เมตร ถึง 120 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง
- ที่ราบลุ่มแม่น้ำ ครอบคลุมพื้นที่ด้านตอนกลางและด้านตะวันออกของจังหวัด เป็นที่ราบที่น้ำท่วมถึง มีแม่น้ำยมและสาขาไหลผ่าน มีความสูงของระดับผิวดินตั้งแต่ 45 เมตรจนถึง 60 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง

4) สภาพภูมิอากาศ

สภาพภูมิอากาศโดยทั่วไปของจังหวัดสุโขทัย มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ แบ่งออกได้เป็น 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดปี ประมาณ 27.6 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 33.0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 22.2 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1,476 มิลลิเมตรต่อปี บริเวณที่มีฝนตกมากที่สุดจะอยู่ตอนบนของจังหวัด บริเวณอำเภอศรีสัชชนาลัย และอำเภอศรีนคร ในช่วงเดือนตุลาคม และต่ำสุดในเดือนธันวาคม

5) สภาพอุทกวิทยา

จากการศึกษาทบทวน โครงการศึกษาสำรวจและจัดทำแผนที่น้ำบาดาลชั้นรายละเอียด มาตรฐาน 1:50,000 (พื้นที่แอ่งน้ำบาดาลเจ้าพระยาตอนบน) พื้นที่ 1 พบว่าปริมาณน้ำท่าส่วนใหญ่ เกิดช่วงฤดูฝน คือ ร้อยละ 80 ของปริมาณฝนรายปี และสรุปปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยในกลุ่มน้ำสาขาต่าง ๆ ของลุ่มน้ำยมในเขตพื้นที่จังหวัดสุโขทัยได้ว่า ห้วยแม่สินมีปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย 139.09 ล้านลูกบาศก์ เมตรต่อปี ห้วยแม่มอกมีปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย 165.55 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ห้วยแม่รำพันมีปริมาณ น้ำท่าเฉลี่ย 100.11 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และแม่น้ำยมตอนล่างมีปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย 1,513.98 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

6) การใช้ที่ดิน

ตารางที่ 3-1 การใช้ที่ดินในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

รูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน	จังหวัดสุโขทัย	
	พื้นที่ (ไร่)	ร้อยละ
1. ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์และโรงเรือนเลี้ยงสัตว์	3,526	0.1
2. นาข้าว	1,071,182	30.64
3. พืชไร่	508,429.80	14.54
4. พืชสวน	671	0.02
5. พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง	151,411	4.33
6. พื้นที่ป่าไม้	1,302,564	37.26
7. ไม้ผล	131,854	3.77
8. ไม้ยืนต้น	42,680	1.22
9. พื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	2,327	0.07
10. แหล่งน้ำ	50,612	1.45
11. พื้นที่อื่นๆ	230,926	6.61
รวมทั้งหมด	2,987,751	100

ที่มา (กรมพัฒนาที่ดิน, 2549)

8) ชั้นดิน

ลำดับชั้นดินของหินชั้น หินแปร และตะกอนร่วน ที่พบในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย เรียงอายุจากเก่ามาอ่อน ได้ดังนี้

8.1 หินยุคไซลูเรียน - ดีโวเนียน (SD)

ประกอบด้วย หินดินดานเนื้อเถ้าภูเขาไฟ เนื้อฟิลโลสตี เททาแกมเขียว สลับชั้นกับหินปูนชั้นบาง หินควอร์ตไซต์ หินฟิลโลสตี หินชนวน และหินไมกาซิสต์ สีเทาและสีเทาแกมเขียว บางแห่งมีหินปูนชั้นบาง และหินอ่อนพบรวมด้วย หมวดหินนี้อายุประมาณ 360-438 ล้านปี พบกระจายตัวบริเวณเทือกเขาทางทิศใต้ของอำเภอบ้านด่านลานหอย ตามเส้นทางจากบ้านลานหอยไปบ้านใหม่เจริญผลทางทิศตะวันตก ได้แก่ เขาเกวียนใหม่ เขาดั้งกลาง เขาหนองหอย และเทือกเขาเขียวต่อเนื่องไปในจังหวัดกำแพงเพชร ดินที่ผุพังมาจากหินดินดานมีแร่ธาตุอุดมสมบูรณ์พอสมควร โดยเฉพาะแร่ธาตุอาหารเสริมสำหรับพืช จึงสามารถใช้ประโยชน์ในด้านการเพาะปลูกได้ค่อนข้างดี แต่ดินอาจมีความร่วนซุยต่ำ

8.2 หินยุคคาร์บอนิเฟอรัส (C)

ประกอบด้วย หินเมตาทัฟฟ์ หินควอร์ตไซต์ หินซิสต์ หินควอร์ตซิสต์ หินคลอไรต์ซิสต์และเลนส์หินปูน หมวดหินนี้อายุประมาณ 286-360 ล้านปี พบกระจายตัวบริเวณเขาหนองตม เขาตูปหูช้าง เขาหนองหินแลง บริเวณทิศตะวันตกเฉียงใต้ของบ้านตลิ่งชัน อำเภอบ้านด่านลานหอย จังหวัดสุโขทัย

8.3 หินยุคเพอร์เมียน (P)

หินยุคเพอร์เมียนมีอายุประมาณ 286-245 ล้านปี ในส่วนที่เป็นหินปูนจะแสดงลักษณะภูมิประเทศแบบคาสต์ (Karst) หินปูนมีส่วนประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มีประโยชน์สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบทั้งในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมเคมี นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้ดี หินปูนมีคุณสมบัติสามารถละลายน้ำได้ในน้ำที่มีสภาพเป็นกรดอ่อนๆ ดังนั้นจึงมักพบถ้ำที่มีหินงอกหินย้อยอยู่ในภูเขาหินปูน หินปูนที่อยู่ใกล้หินแกรนิตจะแปรสภาพกลายเป็นหินอ่อนสามารถนำมาใช้เป็นหินประดับได้ ส่วนดินที่ผุพังมาจากหินปูนมักมีสีส้มแดงที่เรียกว่า ดินแดงหรือดินแตรรรอสะซ่า (Terra Rosa) มีแร่ธาตุที่จำเป็นต่อพืชอยู่หลายชนิด ดังนั้นพื้นที่ราบที่อยู่ใกล้หินปูนจึงเป็นแหล่งเพาะปลูกได้ดี แม้ว่าภูเขาหินปูนจะมีความสูงชันและแสดงหน้าผาชัดเจน แต่เนื่องจากไม่มีตะกอนดินสะสมตัวอยู่บนยอดเขา ดังนั้นจึงไม่ใช่พื้นที่ที่เสี่ยงภัยต่อดินถล่ม แต่อาจพบปรากฏการณ์หลุมยุบในบริเวณที่ราบใกล้ภูเขาหินปูน

8.4 หินยุคไทรแอสซิก (TR)

1) หมวดหินเขาพลึง ประกอบด้วย หินดินดานหรือหินโคลน สีเทา สีเทาดำ ขนาดชั้นบางสลับด้วยหินทรายแกร่งแวกแสดแนวแตกเรียบชัดเจน บางบริเวณเป็นหินทรายแกร่งแวกสลับด้วยหินโคลน หินโคลนสลับหินเชิร์ต และหินเชิร์ตชั้นบาง พบซากดึกดำบรรพ์จำพวกเรดิโอลาเรีย หมวดหินนี้พบกระจายตัวบริเวณทางตอนเหนือของอำเภอศรีสัชชนาลัย ต่อเนื่องไปในเขตจังหวัดอุตรดิตถ์ ได้แก่ บริเวณดอยม่อนข้าวหลาม ดอยห้วยกุ่ม เป็นต้น

2) หมวดหินพระราชู จัดอยู่ในกลุ่มหินลำปาง ประกอบด้วย หินกรวดมนสีน้ำตาลแกมแดง หินดินดาน หินทรายเนื้อทัฟฟ์ สีเทาถึงสีน้ำตาลแกมแดง หินดินดานเนื้อปนปูน และหินปูนเป็นเลนส์ หินทัฟฟ์เนื้อไรโอไลต์ และหินกรวดเหลี่ยม พบกระจายตัวบริเวณโดยรอบของเทือกเขาทิศตะวันตกของอำเภอศรีมาศ และอำเภอเมืองสุโขทัย ใกล้กับบ้านเมืองเก่า บ้านนาเชิงคีรี บ้านศรีมาศ เป็นต้น

3) หมวดหินฮ่องหอย จัดอยู่ในกลุ่มหินลำปาง ประกอบด้วย หินดินดานสีเทาแกมเขียวถึงเทาดำ ขนาดชั้นบาง หินทรายแป้งเนื้อทัฟฟ์ หินทรายสีเทาแกมเขียว หินปูนเป็นชั้นบางๆ หินกรวดมนชั้นบาง สีเทาแกมเขียวถึงสีน้ำตาลแกมแดง พบบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของอำเภอบ้านด่านลานหอย ได้แก่ บริเวณอ่างเก็บน้ำคลองโนนแขก เป็นต้น

4) หมวดหินก้างปลา จัดอยู่ในกลุ่มหินลำปาง ประกอบด้วย หินปูนสีเทาถึงสีดำ เนื้อละเอียดถึงละเอียดมาก ขนาดชั้นบางถึงไม่แสดงชั้น บางส่วนมีการตกผลึกใหม่ หินดินดานสลับกับหินปูน หินทรายแป้ง และหินกรวดมน พบซากดึกดำบรรพ์จำพวกปะการังและพลับพลึงทะเล

5) หมวดหินวังซัน จัดอยู่ในกลุ่มหินลำปาง ประกอบด้วย หินดินดาน หินทรายสีเทา สีเทาแกมเขียว หินทรายแป้ง หินโคลน หินกรวดมน และหินปูนบ้าง พบซากดึกดำบรรพ์จำพวกและหอยสองฝา แผ่กระจายตัวบริเวณตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ต่อเนื่องเข้าไปในจังหวัดลำปาง

8.5 หินยุคจูแรสซิก (J)

หมวดหินภูกระดึง จัดอยู่ในกลุ่มหินโคราช ประกอบด้วย หินทรายแป้ง หินทรายสีน้ำตาลแกมม่วง ม่วงแกมแดง และเทาแกมเขียว ขนาดชั้นบางถึงปานกลาง สลับด้วยหินดินดาน สีแดง ม่วงแกมแดง และสีเทาแกมเขียว ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัยพบกระจายตัวไม่มากนัก ได้แก่ ดอยสามล้านและบริเวณเนินจระเข้ ทางตอนใต้ของอำเภอศรีสัชชนาลัย

8.6 หินยุคจูแรสซิก - ครีเทเชียส (JK)

หมวดหินพระวิหาร จัดอยู่ในกลุ่มหินโคราช ประกอบด้วย หินทรายสีขาว การัดขนาดดี เนื้อปานกลางถึงหยาบ สารเชื่อมประสานเป็นซิลิกา ขนาดชั้นปานกลางถึงชั้นหนา และ

แสดงการวางชั้นเฉียงระดับ พบกระจายตัวเป็นพื้นที่เล็กๆบริเวณเขาใหญ่ บ้านจันทโรภาส ห่างจากอำเภอสุวรรณคโลก ไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ประมาณ 5 กิโลเมตร

8.7 ตะกอนร่วนยุคควอเทอร์นารี (Q)

ตะกอนควอเทอร์นารี หมายถึง กรวด ทราย ดิน และดินเหนียว ที่ยังไม่แข็งตัว กลายเป็นหิน อายุประมาณ 1.8 ล้านปีก่อน ปัจจุบันตะกอนควอเทอร์นารีพบตามภูมิภาคที่เป็นที่ลาดเชิงเขา ที่ลาดลอนคลื่น และที่ราบลุ่มแม่น้ำ สามารถจำแนกเขตตะกอนร่วนในพื้นที่โดยอาศัยชนิดของตะกอนและสภาวะแวดล้อมของการตกตะกอนออกเป็น 5 หน่วยตะกอน คือ

1) ตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนผุพังอยู่กับที่ (Qc) ประกอบด้วย เศษหิน กรวดทราย ทรายแป้ง ดินลูกรัง และศิลาแลง เกิดจากการผุพังของหินเดิม ตะกอนถูกพัดพาไม่ไกลจึงมักพบตามเชิงเขาหรือขอบแอ่ง หน่วยตะกอนนี้ใช้เป็นแหล่งดินถมสำหรับการก่อสร้างได้ดี และเป็นหลักฐานสำหรับแสดงถึงการเกิดแผ่นดินถล่มในอดีต เนื่องจากการปรับตัวสู่สมดุลของธรรมชาติ ซึ่งหลายพื้นที่ยังคงมีความเสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มได้อีก จึงไม่เหมาะสำหรับการตั้งที่อยู่อาศัย

2) ตะกอนน้ำพา (Qa) ประกอบด้วย กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว เกิดจากน้ำพัดพา กรวด หิน ดิน ทราย ไปสะสมตัว ลักษณะเป็นภูมิภาคที่ราบริมน้ำ พื้นที่ราบนี้มักเป็นแหล่งสะสมตัวของชั้นทรายแม่น้ำ บางแห่งสามารถหาแหล่งทรายก่อสร้างและดินเหนียวสำหรับเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา โดยทั่วไปสภาพดินเป็นดินร่วนที่มีแร่ธาตุที่จำเป็นต่อพืชอุดมสมบูรณ์เหมาะต่อการเพาะปลูกมากที่สุด แต่เนื่องจากเป็นที่ราบจึงมักประสบกับน้ำท่วมขังในช่วงฤดูฝนเป็นประจำ

3) ตะกอนร่องน้ำ (Qfc) ประกอบด้วย ทรายร่องน้ำ สันดอนทราย และคันดิน ธรรมชาติในพื้นที่พบเป็นตะกอนที่สะสมตัวตามแนวแม่น้ำยม ตั้งแต่อำเภอศรีสัชชาลัย อำเภอสุวรรณคโลก อำเภอศรีสำโรง จนถึงอำเภอเมืองจังหวัดสุโขทัย

4) ตะกอนเนินตะกอนรูปพัด (Qfa) ประกอบด้วย กรวด ทราย ทรายปนกรวด ทรายแป้งปนทราย เนื้อละเอียดถึงหยาบ เม็ดเป็นเหลี่ยม เป็นเนินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวของตะกอนในบริเวณที่มีการเปลี่ยนระดับของทางน้ำจากหุบเขาชันลงสู่ที่ราบ ซึ่งจะทำให้ความเร็วของกระแสน้ำลดลงจนไม่สามารถนำพาตะกอนบางส่วนต่อไปได้ ตะกอนดังกล่าวจึงตกสะสมกระจายออกไปรอบข้างเป็นรูปพัด ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัยพบกระจายตัวบริเวณตอนเหนือของอำเภอบ้านด่านลานหอย และทางตอนล่างของอำเภอศรีมาศ เป็นต้น

5) ตะกอนที่ราบลุ่มแม่น้ำ (Qff) ประกอบด้วย กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวเป็นหน่วยตะกอนที่แผ่กระจายตัวครอบคลุมพื้นที่มากที่สุด บริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำยม

ครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่อำเภอศรีษะนาถ อำเภอสุวรรณภูมิ อำเภอศรีสำโรง อำเภอเมืองจังหวัดสุโขทัย อำเภอกงไกรลาศ และอำเภอคีรีมาศ

9) สภาพอุทกธรณีวิทยา

จังหวัดสุโขทัย มีลักษณะกายภาพทางอุทกธรณีวิทยาเป็นลักษณะแอ่งน้ำบาดาลย่อย ซึ่งเป็นแอ่งสาขาของแอ่งน้ำบาดาลเจ้าพระยาตอนบน สามารถแบ่งชั้นน้ำบาดาลออกเป็น 3 ชั้น ดังนี้

9.1 ชั้นน้ำตะกอนน้ำพา (Quaternary Flood Plain Deposit Aquifer, Qfd) ชั้นน้ำบาดาลเจ้าพระยา (Qcp) ประกอบด้วย ชั้นตะกอนทรายขนาดต่าง ๆ ทรายแป้ง กรวดขนาดต่าง ๆ สลับด้วยชั้นดินเหนียวชั้นทรายปนกรวด มีความกลมมนปานกลางถึงดี และมีการคัดขนาดปานกลางถึงดี พบตามริมฝั่งแม่น้ำวัง แม่น้ำยมและแม่น้ำน่าน ที่ลุ่มน้ำหลาก ร่องน้ำเก่า และสันดอนรูปพัด จากข้อมูลภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาและข้อมูลบ่อน้ำบาดาลของแอ่งเจ้าพระยาตอนบนสามารถประมวลได้ว่า ชั้นน้ำนี้มีความหนาประมาณ 15-45 เมตร หรือเฉลี่ยประมาณ 30 เมตร ให้ปริมาณน้ำบาดาลได้ในเกณฑ์ 10-20 ลบ.ม./ชม. บางบริเวณอาจให้ปริมาณน้ำได้มากกว่า 50-110 ลบ.ม./ชม. น้ำที่ได้มีคุณภาพดีและเหมาะสมสำหรับการอุปโภค-บริโภค ยกเว้นมีปริมาณเหล็กค่อนข้างสูง

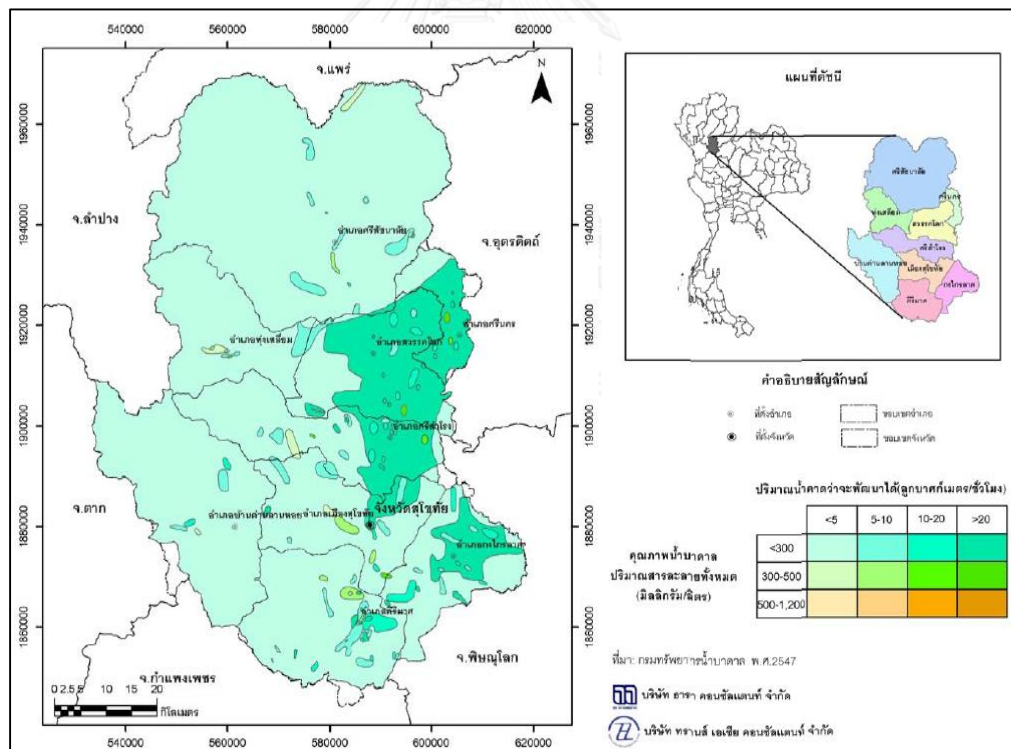
9.2 ชั้นน้ำตะกอนตะพักกลุ่มน้ำยุคใหม่ (Quaternary Younger Terrace Aquifer, Qyt) หรือชั้นน้ำตะกอนตะพักระดับต่ำ (Quaternary Lower Terrace Aquifer, Qlt) ชั้นน้ำบาดาลเชิงทราย (Qcr) ประกอบด้วยชั้นตะกอนดินเหนียวปนทราย ทรายแป้ง กรวดขนาดต่าง ๆ ที่ตกสะสมตัวในแอ่ง ภายใต้สภาพแวดล้อมธารน้ำพาและเนินตะกอนน้ำพารูปพัด (Fluvial and Alluvial Fan Environments) ตะกอนต่าง ๆ มีการคัดขนาดไม่ดีถึงดีปานกลาง ส่วนใหญ่เป็นชั้นดินเหนียวปนทรายและหรือชั้นดินเหนียวที่ค่อนข้างหนา สลับด้วยชั้นทรายปนกรวดค่อนข้างบางหรือมีลักษณะเป็นเลนส์ เนื่องจากแอ่งเจ้าพระยาตอนบนมีความลึกของแอ่งทางด้านทิศตะวันตกมากกว่าทางด้านทิศตะวันออก และมีหินฐานรอบแอ่งที่เป็นต้นกำเนิดของตะกอนที่แตกต่างกัน ดังนั้นชั้นน้ำตะกอนตะพักระดับต่ำทางซีกด้านทิศตะวันตกของแอ่ง (และของพื้นที่ศึกษา) จึงมีตะกอนกรวดและทรายมากกว่าทางซีกด้านทิศตะวันออก ที่ส่วนใหญ่พบเป็นชั้นทรายปนดินเหนียวและชั้นดินเหนียวสลับด้วยชั้นทรายปนกรวดชั้นบาง ๆ โดยชั้นน้ำนี้แผ่ขยายตัวบนผิวดินและวางตัวรองรับอยู่ใต้ชั้นน้ำตะกอนน้ำพา ซึ่งจากข้อมูลภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาและข้อมูลบ่อน้ำบาดาลของแอ่งเจ้าพระยาตอนบน สามารถอธิบายได้ว่า ชั้นน้ำนี้มีความหนาระหว่าง 40-80 เมตร แล้วแต่พื้นที่และให้

ปริมาณน้ำบาดาลได้ในเกณฑ์ 5-20 ลบ.ม./ชม. ส่วนใหญ่มีอัตราเฉลี่ย 5-12 ลบ.ม./ชม. น้ำที่ได้มีคุณภาพดี เหมาะสำหรับการอุปโภค-บริโภค ยกเว้นมีปริมาณเหล็กค่อนข้างสูง แม้กระนั้นยังมีปริมาณต่ำกว่าปริมาณเหล็กในชั้นน้ำตะกอนน้ำพา ทั้งนี้เพราะชั้นน้ำนี้ได้ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและกายภาพที่ยาวนาน จนทำให้เหล็กบางส่วนแปรสภาพไปแล้ว

9.3 ชั้นน้ำตะกอนตะพักกลุ่มน้ำยุคเก่า (Quaternary Older Terrace Aquifer, Qot) หรือชั้นน้ำตะกอนตะพักระดับสูง (Quaternary Higher Terrace Aquifer, Qht) หรือชั้นน้ำบาดาลเชิงใหม่ (Qcm) ประกอบด้วยชั้นตะกอนกรวดขนาดต่าง ๆ ชั้นทรายปนดินเหนียวปนกรวด ชั้นทรายแป้งสลับชั้นดินเหนียวปนกรวด สลับด้วยกระเปาะหรือเลนส์ของดินเหนียวปนทราย บางแห่งประกอบด้วยเศษหินเชิงเขา ลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม โดยทั่วไปตะกอนของชั้นน้ำนี้มีกรวดขนาดไม่ถึงปานกลาง มีลักษณะเป็นเหลี่ยมถึงกึ่งกลมมน และมีการตกทับถมภายใต้สภาวะแวดล้อมธารน้ำพา (Fluvatile) เนินตะกอนน้ำพารูปพัด (Alluvial Fan) และดินดอนสามเหลี่ยมน้ำพารูปพัด (Fan Delta) ดังนั้น บริเวณกลางแอ่งจึงมีการคัดขนาดดีกว่าบริเวณใกล้ขอบแอ่ง โดยชั้นน้ำนี้แผ่ขยายตัวอยู่ในบริเวณถัดจากเชิงเขาลงมาจนถึงบริเวณลาดเชิงเขาและลาดลอนคลื่น ที่เรียกว่า ตะพักกลุ่มน้ำระดับสูง (High Terraces) โดยวางตัวอยู่ใต้ชั้นน้ำตะกอนตะพักกลุ่มน้ำยุคใหม่ และชั้นน้ำตะกอนน้ำพาจากข้อมูลภาพถ่ายทางอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลบ่อน้ำบาดาลของแอ่งเจ้าพระยาตอนบนสามารถอธิบายได้ว่า ชั้นน้ำนี้มีความหนาเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่ กล่าวคือ ในบริเวณตะพักระดับสูง ชั้นน้ำนี้จะวางตัวปิดทับอยู่บนหินฐาน (Basement) และมีความหนาประมาณ 10-55 เมตร ส่วนในบริเวณทุ่งราบหรือบริเวณลานตะพักกลุ่มน้ำระดับต่ำ และบริเวณที่ราบน้ำท่วมถึง ชั้นน้ำนี้จะวางตัวรองรับอยู่ข้างล่างและมีความหนาระหว่าง 100-300 เมตร แล้วแต่พื้นที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณแอ่งย่อยต่าง ๆ (Tertiary Subbasins) เช่น แอ่งสุโขทัย ชั้นน้ำนี้อาจหนามากกว่า 300-350 เมตรและเป็นแหล่งน้ำบาดาลที่มีศักยภาพสูงกว่าบริเวณอื่น โดยเกณฑ์การให้น้ำของชั้นน้ำนี้แปรเปลี่ยนไปตามความหนาและคุณลักษณะอื่น ๆ ตั้งแต่ 5-10 ลบ.ม./ชม. ในบริเวณใกล้ขอบแอ่งจนถึงมากกว่า 40-100 ลบ.ม./ชม. ในบริเวณกลางแอ่งมีน้ำที่ได้คุณภาพดี เหมาะสำหรับการอุปโภค-บริโภคยกเว้นมีปริมาณเหล็กค่อนข้างสูง แม้กระนั้นยังมีปริมาณต่ำกว่าปริมาณเหล็กในชั้นน้ำตะกอนน้ำพาและชั้นน้ำตะกอนตะพักกลุ่มน้ำยุคใหม่

10) ศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล

ศักยภาพแหล่งน้ำบาดาลจังหวัดสุโขทัย สภาพแหล่งน้ำบาดาลโดยรวมของพื้นที่ของจังหวัดสุโขทัย พบว่าประมาณร้อยละ 17 ของพื้นที่ ประกอบด้วย หินร่วน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำบาดาลที่ดี ให้น้ำมาก ซึ่งมีปริมาณน้ำที่เก็บกักไว้ประมาณ 10,725 ล้านลูกบาศก์เมตรคิดเป็นปริมาณน้ำที่พัฒนาได้ประมาณ 989 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี พื้นที่อีกร้อยละ 7 เป็นหินปูน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำบาดาลที่ดีมีปริมาณน้ำมากสามารถพัฒนาขึ้นมาใช้ประโยชน์ได้ พื้นที่อีกร้อยละ 34 เป็นหินทราย หินดินดานและหินกรวดมน ซึ่งมีปริมาณน้ำปานกลาง และอีกร้อยละ 42 เป็นหินอัคนีและหินแปร ซึ่งมีน้ำบาดาลกักเก็บอยู่น้อย ในด้านคุณภาพน้ำบาดาลส่วนมากอยู่ในเกณฑ์ดีถึงพอใช้ได้ แม้ว่าจะมีปริมาณฟลูออไรด์ ซัลเฟตเหล็กและความกระด้างอยู่สูง บางพื้นที่ บริเวณที่มีค่าสารละลาย (Total Dissolved Solids, TDS) เกินกว่า 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร พบเพียงเล็กน้อย มีประสิทธิภาพการให้น้ำ 10-20 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน



รูปที่ 3-2 ศักยภาพน้ำบาดาลของจังหวัดสุโขทัย

ที่มา (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล., 2553b)

11) ปริมาณการใช้น้ำในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

จากรายงานโครงการสำรวจสถานภาพบ่อน้ำบาดาล ศึกษากำหนดเครือข่ายบ่อสังเกตการณ์และประเมินการใช้น้ำบาดาล เพื่อบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลของประเทศ ปี พ.ศ. 2556 สรุปปริมาณการใช้น้ำของจังหวัดสุโขทัย ไว้ดังนี้

ตารางที่ 3-2 ปริมาณการใช้น้ำในจังหวัดสุโขทัย

จังหวัด	การอุปโภคบริโภค (ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี)									
	ประปาภูมิภาค		ประปาหมู่บ้าน/ เทศบาล		บ่อน้ำ ตื้น	บ่อ เอกชน	รวมทั้งหมด		สัดส่วนนำมาใช้	
	ผิวดิน	บาดาล	ผิวดิน	บาดาล			ผิวดิน	บาดาล	ผิวดิน	บาดาล
สุโขทัย	3.77	2.70	3.23	20.24	0.27	0.44	7	23.66	30.2	69.8

จังหวัด	อุตสาหกรรม (ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี)				
	ประปาภูมิภาค		บ่อเอกชน	รวมทั้งหมด	
	ผิวดิน	บาดาล		ผิวดิน	บาดาล
สุโขทัย	0.47	8.81	0.44	0.47	9.25

จังหวัด	เกษตรกรรม (ล้าน ลบ.ม./ปี)		
	บ่อน้ำตื้น	บ่อเอกชน	รวมทั้งหมด
สุโขทัย	55.47	0.14	55.61

ที่มา (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2556)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสามารถอธิบายเป็นลำดับขั้นตอน ได้ดังนี้

1. รวบรวม และทบทวนรายงาน วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ได้แก่
 - 1.1 ศึกษาสภาพทั่วไปในพื้นที่ศึกษา
 - 1.2 ศึกษาการบริหารจัดการน้ำบาดาลเพื่อบรรเทาภัยแล้งจากพื้นที่ที่เคยมีการศึกษา
 - 1.3 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

2. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการศึกษา
 - 2.1 ข้อมูลสภาพทางอุตุนิยมิวิทยา
 - ข้อมูลอุณหภูมิรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)
 - ข้อมูลฝนรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)
 - ข้อมูลอัตราการระเหยจากผิวดินรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)
 - อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)
 - พลังงานแสงอาทิตย์รายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)
 - ความเร็วลมรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)
 - ความชื้นสัมพัทธ์รายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)

 - 2.2 ข้อมูลอุทกวิทยา
 - ข้อมูลฝนรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)
 - ข้อมูลอัตราการไหลในลำน้ำรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)
 - ข้อมูลความต้องการใช้น้ำบาดาล (ปี พ.ศ. 2556)
 - ข้อมูลปริมาณการสูบน้ำบาดาล (ปี พ.ศ. 2556)

 - 2.3 ข้อมูลเชิงพื้นที่
 - ข้อมูลการใช้ที่ดิน
 - Digital Elevation Model (DEM)
 - แผนที่จำแนกชนิดของดิน

3. ออกแบบตำแหน่งและจำนวนตัวอย่างน้ำที่เหมาะสมสำหรับเก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์องค์ประกอบของไอโซโทปเสถียรของน้ำตัวอย่าง

4. ประยุกต์ใช้เทคนิคอุทกวิทยาไอโซโทปเสถียร
 - วิเคราะห์หาแหล่งกำเนิดของน้ำบาดาลโดยใช้อัตราส่วนของไอโซโทปเสถียร
 - วิเคราะห์หาลักษณะการเติมน้ำจากน้ำผิวดินสู่ชั้นน้ำใต้ดิน หรือจากน้ำบาดาลสู่น้ำผิวดิน

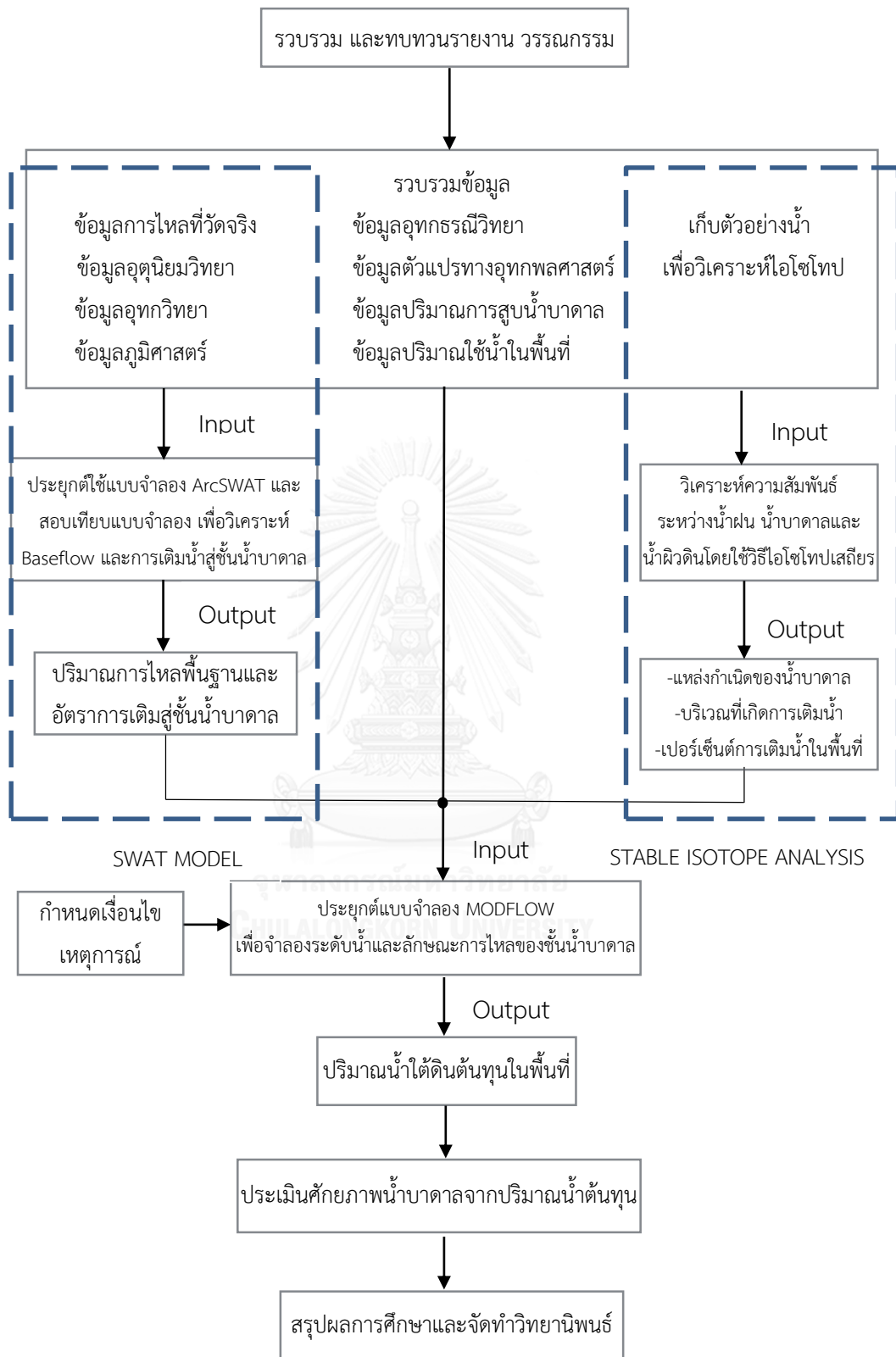
5. ประยุกต์ใช้แบบจำลอง ArcSWAT เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำใต้ดินและน้ำผิวดินในพื้นที่ศึกษา
 - วิเคราะห์ปริมาณการไหลของน้ำบาดาลจากปริมาณการไหลในลำน้ำ โดยกำหนดตัวแปรตามลักษณะข้อมูลในพื้นที่
 - ปรับแก้แบบจำลอง (Model Calibration) และสอบทานแบบจำลอง (Model Verification) จากข้อมูลที่ได้จากการวัดจริง
 - จัดทำแบบจำลอง SWAT ของพื้นที่ศึกษา

6. วิเคราะห์อัตราการเติมน้ำ (Recharge) และปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ระหว่างการวิเคราะห์ไอโซโทปเสถียร และแบบจำลอง SWAT

7. ประยุกต์แบบจำลอง MODFLOW โดยใช้ข้อมูลอัตราการเติมน้ำและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง SWAT เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา

8. ประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย จากปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและปริมาณการใช้น้ำบาดาลในพื้นที่

9. รวบรวมผลที่ได้จากการวิจัย สรุปผลการศึกษาและจัดทำวิทยานิพนธ์



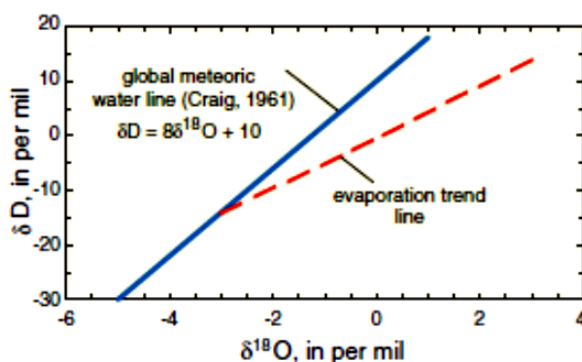
รูปที่ 3-3 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3 วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษา เป็นส่วนอธิบายขั้นตอนการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 การศึกษาส่วนที่ 1 ศึกษาความเชื่อมโยงเชิงพลศาสตร์ระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน จากองค์ประกอบของไอโซโทปเสถียรของน้ำจากแหล่งต่างๆ อาทิ น้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล

- วัตถุประสงค์
 - เพื่อศึกษาความเชื่อมโยงเชิงพลศาสตร์ระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน โดยพิสูจน์จากองค์ประกอบของไอโซโทปเสถียรของน้ำจากแหล่งต่างๆ ในพื้นที่ศึกษา
 - เพื่อประมาณสัดส่วนน้ำที่เพิ่มเติมและไหลออกจากแหล่งน้ำบาดาล
- วัสดุและอุปกรณ์
 - ตัวอย่างน้ำจากแหล่งต่างๆ อาทิ น้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล เพื่อวิเคราะห์ไอโซโทปเสถียร
- ขั้นตอนการศึกษา
 - เก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ไอโซโทปเสถียร (Stable Isotopes) โดยเก็บใส่ขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร ปิดฝาให้แน่น ส่งไปวิเคราะห์ยังสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) เพื่อวิเคราะห์ไอโซปในน้ำ
 - วิเคราะห์ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรระหว่าง $\delta^{18}\text{O}$ และ δD เพื่อใช้เป็นสมการ LMWL (Local Meteoric Water Line) โดยเทียบกับเส้น GMWL (Global Meteoric Water Line) เพื่อบ่งบอกความชื้นในพื้นที่ และลักษณะการระเหย ดังรูปที่ 3-4 โดยการสร้างสมการเส้นตรง (Linear Regression)



รูปที่ 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\delta^{18}\text{O}$ และ δD
ที่มา (Unesco, 1983)

$$\delta D = a\delta^{18}O + d \quad (3.1)$$

โดยค่าความชัน a ของเส้น Local Meteoric Water Line (LMWL) บ่งบอกปริมาณความชื้นที่พื้นที่ และค่าดิวทีเรียมส่วนเกิน d บ่งบอกต้นกำเนิดแหล่งความชื้นในพื้นที่ และลักษณะการระเหย

- ทาร้อยละการเติมน้ำผิวดินสู่น้ำบาดาล โดยการใช้สมการสมดุลอุทกวิทยาไอโซโทป (Isotopes Mass balance Equation) ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 (จาก Putthividhya, 2014)

$$C(V_A + V_B) = AV_A + BV_B \quad (3.2)$$

$$C = A \frac{V_A}{V_A + V_B} + B \frac{V_B}{V_A + V_B} = A(1 - X) + BX \quad (3.3)$$

โดย	A	คือ	ไอโซโทปเสถียรของฝนในพื้นที่
	B	คือ	ไอโซโทปเสถียรของแม่น้ำในพื้นที่
	C	คือ	ไอโซโทปเสถียรของน้ำใต้ดินในพื้นที่
	V_A	คือ	ปริมาณฝนในพื้นที่
	V_B	คือ	ปริมาณน้ำในแม่น้ำ
	X	คือ	สัดส่วนการเติมน้ำบาดาลของน้ำในแม่น้ำ
	(1-X)	คือ	สัดส่วนการเติมน้ำบาดาลของน้ำฝน

$$d_{\text{groundwater}} = Xd_{\text{wet season}} + (1 - X)d_{\text{dry season}} \quad (3.4)$$

โดย d คือ Dueterium Excess

สมการ (3.4) แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำสู่น้ำบาดาลในฤดูฝนและฤดูแล้ง

- หาความสัมพันธ์ทางชลศาสตร์ โดยใช้สมการสมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทป (Isotope Mass balance Equation)

$$\nabla V = P - E + S_i - S_o + G_i - G_o \quad (3.5)$$

โดย ∇V คือ ปริมาณน้ำที่เปลี่ยนในช่วงเวลาหนึ่ง

P	คือ	ปริมาณน้ำฝนที่ตก
E	คือ	อัตราการระเหย
S _i	คือ	อัตราการไหลเข้าของน้ำท่า
S _o	คือ	อัตราการไหลออกของน้ำท่า
G _i	คือ	อัตราการไหลเข้าของน้ำบาดาล
G _o	คือ	อัตราการไหลออกของน้ำบาดาล

จากสมการสมดุลมวลน้ำข้างต้น จะได้สมการสมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทป (Isotope Mass Balance Equation) โดยใช้ค่า δD และ $\delta^{18}O$ ดังนี้

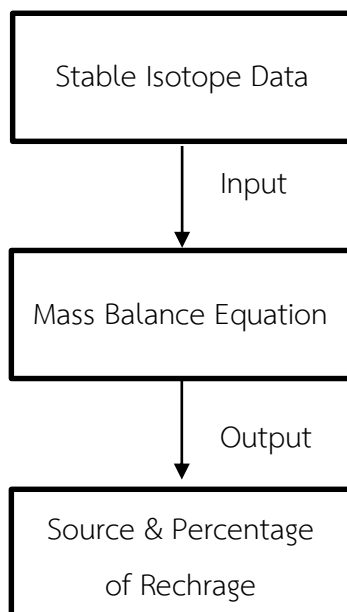
$$\nabla V \delta_L = P \delta_P - E \delta_E + S_i \delta_i - S_o \delta_L + G_i \delta_{Gi} - G_o \delta_L \quad (3.6)$$

โดย	δ_L	คือ	สัดส่วนไอโซโทปของน้ำที่ไหลออกระบบ
	δ_P	คือ	สัดส่วนไอโซโทปของปริมาณฝนที่ตก
	δ_E	คือ	สัดส่วนไอโซโทปของน้ำที่ระเหย
	δ_i	คือ	สัดส่วนไอโซโทปน้ำท่าที่ไหลเข้าระบบ
	δ_{Gi}	คือ	สัดส่วนไอโซโทปน้ำบาดาลที่ไหลเข้าระบบ

ในทฤษฎีไอโซโทปจะกำหนดองค์ประกอบของไอโซโทปของปริมาณน้ำท่าไหลออกอย่าง และไอโซโทปของปริมาณน้ำบาดาลไหลออกอย่างมีค่าเท่ากัน ซึ่งจากสมการข้างต้น ทำให้สามารถหาปริมาณการไหลเข้าของน้ำบาดาลได้ (Sacks, 2002) ดังสมการ

$$G_i = \frac{P \delta_P - E \delta_E + S_i \delta_i - (P - E + S_i - \nabla V) \delta_L - \nabla V \delta_L}{(\delta_L - \delta_{Gi})} \quad (3.7)$$

ในสมการข้างต้นจะสมมติให้พื้นที่ศึกษาอยู่ในสภาวะการไหลคงที่ (Steady State) โดยกำหนดให้ ∇V และ $\nabla V \delta_L$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และนำผลการทดลองที่ได้ เทียบเคียงกับผลจากแบบจำลอง SWAT เพื่อนำเข้าสู่การสร้างแบบจำลอง MODFLOW



รูปที่ 3-5 แผนผังการวิเคราะห์เทคนิคไอโซโทปเสถียร

3.3.2 การศึกษาส่วนที่ 2 ศึกษาปริมาณน้ำผิวดิน และปริมาณที่เติมลงสู่ชั้นน้ำบาดาล โดยใช้แบบจำลอง ArcSWAT

- วัตถุประสงค์
 - เพื่อสร้างแบบจำลองการประเมินปริมาณน้ำผิวดินและปริมาณน้ำที่เติมลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ในพื้นที่ศึกษา
 - เพื่อหาปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ในพื้นที่ในช่วงเวลาต่างๆ
- แบบจำลองและข้อมูลนำเข้า
 1. แบบจำลอง
 - โปรแกรม ArcGIS
 - แบบจำลอง SWAT
 2. ข้อมูลนำเข้า
 - 2.1 ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data)
 - Digital Elevation Model (DEM)
 - แผนที่การใช้ที่ดิน
 - แผนที่จำแนกชนิดของดิน
 - 2.2 ข้อมูลภูมิอากาศ (Weather Data)
 - อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)

- พลังงานแสงอาทิตย์รายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)

- ความเร็วลมรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)

2.3 ข้อมูลอุทกวิทยา (Hydrological Data)

- ปริมาณฝนตกรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)

- ปริมาณการไหลในลำน้ำรายวัน (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)

● ขั้นตอนการศึกษา

1. จัดเตรียมข้อมูล

แบบจำลอง SWAT ต้องใช้ข้อมูลนำเข้าในการจำลองการไหลของน้ำท่าเพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าโดยข้อมูลที่จำเป็นสำหรับแบบจำลอง SWAT ต้องจัดเก็บข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ Spreadsheet

2. ขั้นตอนการดำเนินงานแบบจำลอง SWAT

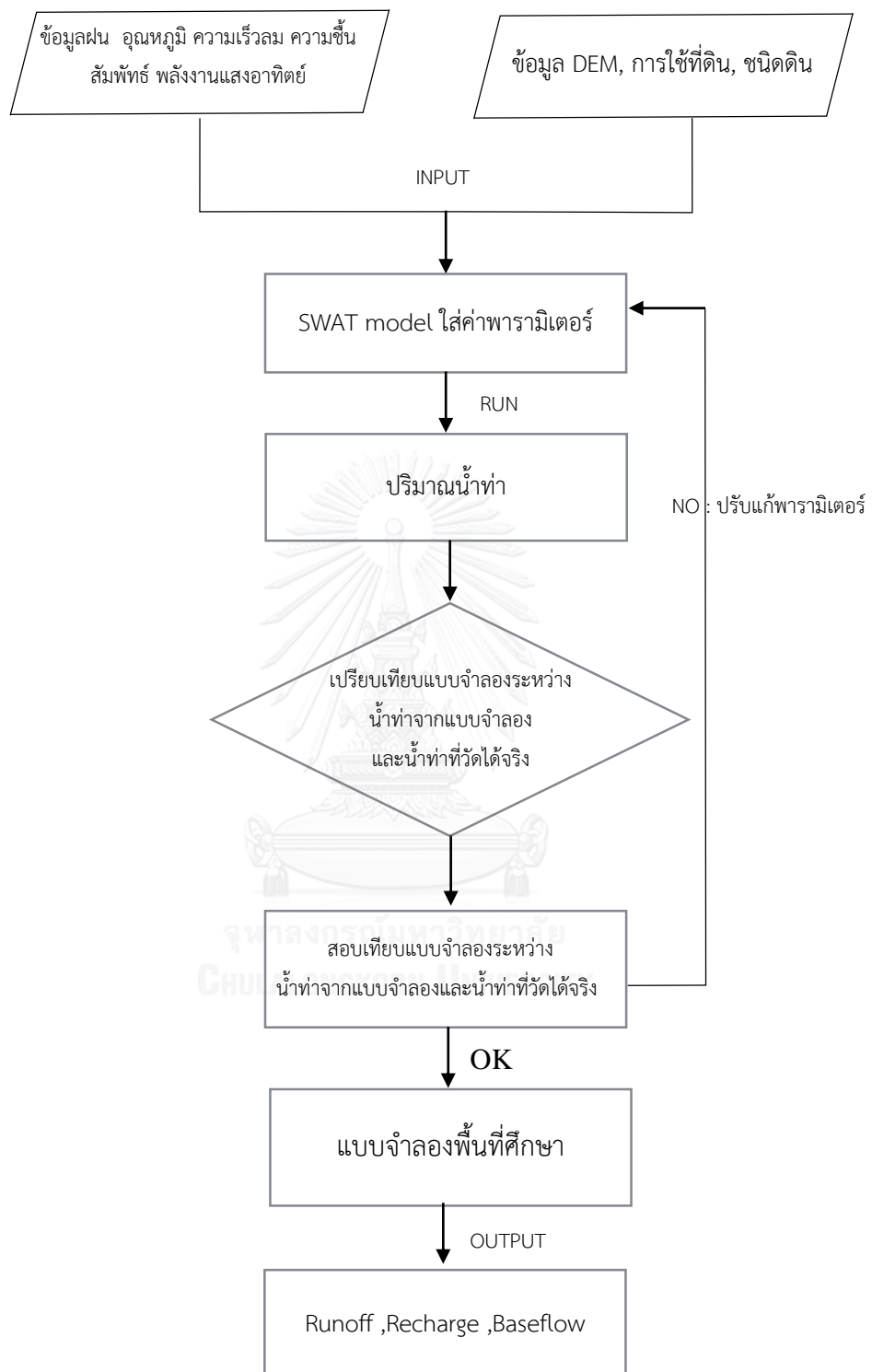
จัดเตรียมฐานข้อมูลเพื่อนำเข้าแบบจำลอง SWAT โดยใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยารายวัน ได้แก่ ข้อมูลฝน ข้อมูลอุณหภูมि ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ข้อมูลความเร็วลม และข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ และข้อมูลเชิงพื้นที่ ได้แก่ ข้อมูลชั้นความสูง ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน และข้อมูลชุดดิน และทำการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำโดยแบบจำลอง SWAT

3. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษา โดยเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง SWAT กับสถานีตรวจวัดน้ำท่า

4. เปรียบเทียบแบบจำลองเพื่อลดความแตกต่างของปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง SWAT กับสถานีตรวจวัดน้ำท่าแม่ข่ายสถานี Y.31 และ Y.14 โดยใช้พารามิเตอร์ R^2 และ NSE โดยให้ทั้งสองค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด

5. จัดทำแบบจำลองของพื้นที่ศึกษา

6. นำอัตราการเติมน้ำและปริมาณการไหลพื้นฐานจากแบบจำลอง SWAT จัดเป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง MODFLOW



รูปที่ 3-6 แผนผังการสร้างแบบจำลอง SWAT

3.3.3 การศึกษาส่วนที่ 3 สร้างแบบจำลองควบน้ำผิวดิน-น้ำบาดาล เพื่อจำลองระดับและลักษณะการไหลโดยใช้แบบจำลอง MODFLOW

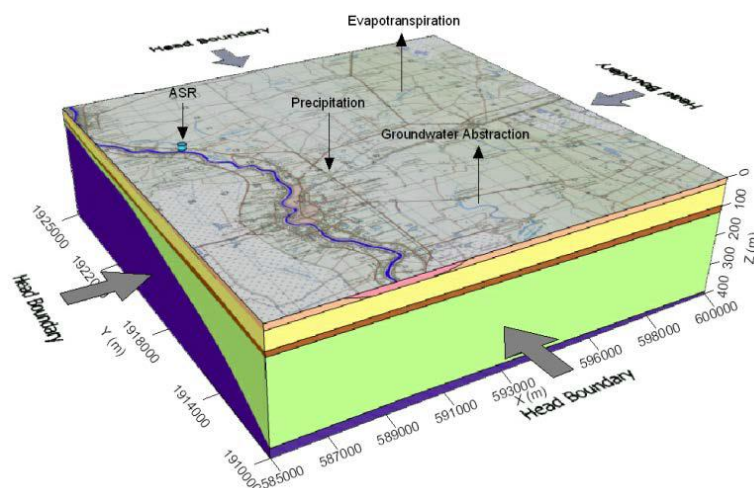
- วัตถุประสงค์
 - เพื่อทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของน้ำบาดาล ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ทางชลศาสตร์ของแหล่งน้ำบาดาลและแหล่งน้ำผิวดิน ทิศทางการไหล ระดับแรงดันน้ำบาดาล สมดุลของน้ำบาดาล
- แบบจำลองและข้อมูลนำเข้า
 1. โปรแกรมแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล (GMS MODFLOW)
 2. ข้อมูลนำเข้า
 - สภาพอุทกธรณีวิทยา และชั้นน้ำบาดาลภายในพื้นที่ศึกษา
 - ลักษณะภูมิประเทศ
 - ค่าตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์ เช่น ค่าการแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์ (D) ค่าตัวประกอบความหน่วง (R) ค่าความนำทางชลศาสตร์ (K) ความพรุน (θ) ค่าอัตราการไหลของน้ำบาดาล ณ ตำแหน่งต่างๆ
 - ค่าพิกัดต่างๆ พื้นหลักฐานทางราบ พื้นหลักฐานทางตั้ง ที่ใช้อ้างอิงระบบพิกัดภูมิศาสตร์
 - ปริมาณการสูบน้ำบาดาล
 - ความต้องการใช้น้ำในพื้นที่
- ขั้นตอนการศึกษา

ในการจัดทำแบบจำลอง 3 มิติ ได้เลือกใช้โปรแกรม GMS MODFLOW V.9.1 เป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์โดยวิธี Finite Difference ประกอบด้วยโปรแกรม MODFLOW 2000 ใช้ในการจำลองการไหลของน้ำบาดาล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model)

แผนภาพแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ดังรูป 3-5 แสดงรายละเอียดระบบอุทกวิทยาของพื้นที่ศึกษาประกอบด้วย ชั้นน้ำบาดาลชนิดตะกอนร่วนที่มีแรงดันและกึ่งมีแรงดัน และจากลักษณะอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา พบว่า บริเวณด้านทิศเหนือ ทิศตะวันตก กำหนดขอบเขตเป็นแบบ

No-flow Boundaries ทิศตะวันออก และทิศใต้ของแบบจำลองมีการไหลเข้าและไหลออกจากพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ใกล้เคียง จึงกำหนดสภาพขอบเขตเป็นแบบ Head Boundaries บริเวณชั้นบนของแบบจำลองเป็นขอบเขตที่มีการเพิ่มเติมของน้ำ (Recharge Boundaries) ส่วนบริเวณชั้นล่างของแบบจำลองที่เป็นชั้นหินแข็งยุคเพอร์เมียน-คาร์บอนิเฟอรัสรองรับอยู่กำหนดให้เป็นสภาพขอบเขตเป็นแบบขอบเขตที่น้ำไม่ไหลผ่าน เนื่องจากชั้นหินมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ จึงถือว่าน้ำไม่สามารถผ่านได้



รูปที่ 3-7 แบบจำลองน้ำบาดาลเชิงโมโนทัศน

2. การออกแบบแบบจำลอง (Model design)

2.1 ระดับด้านบนและระดับด้านล่าง (Top and Bottom) ข้อมูลระดับพื้นดิน ใช้ข้อมูลจากแผนที่ภูมิประเทศ 1:50,000 ส่วนระดับด้านบนและระดับด้านล่างของแต่ละชั้นน้ำ ใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายทางอากาศธรณีวิทยา

2.2 ขนาดของกริดและจำนวนชั้น (Model Grids and Layers) กำหนดพื้นที่แบบจำลองเป็นพื้นที่ขอบเขตการปกครองจังหวัดสุโขทัย มีพื้นที่ 6,596 ตารางกิโลเมตร มีความกว้าง 67 กิโลเมตร เริ่มจากพิกัด UTM 543000 E ถึง 610000 E มีความยาว 131 กิโลเมตร จากพิกัด 1971000 N ถึง 1840000 N ระดับความสูงของพื้นที่ตั้งแต่ 50 เมตร ถึง 1200

3. สภาพขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary Conditions) จากการศึกษารูปถ่ายทางอากาศธรณีวิทยา ตามภาคผนวก ข พบว่าด้านทิศเหนือ และทิศตะวันตก เป็นภูเขาที่บ้น้ำ จึงกำหนดให้บริเวณด้านทิศเหนือ และทิศตะวันตก ของแบบจำลองไม่มีการไหลเข้าของน้ำบาดาล ด้านทิศตะวันออก และทิศใต้ ของแบบจำลองมีการไหลเข้า-ออกของน้ำบาดาล ตามลักษณะการไหลของ

แม่น้ำยม จึงกำหนดสภาพขอบเขตด้านทิศเหนือ และทิศตะวันตก เป็นแบบ Noflow Boundaries และด้านทิศเหนือ และทิศตะวันตกเป็น Head Boundaries ตามลำดับ บริเวณด้านบนของแบบจำลองเป็นขอบเขตที่มีการเพิ่มเติมของน้ำ (Recharge Boundaries) ส่วนบริเวณด้านล่างของแบบจำลองที่เป็นชั้นแข็งยุคเพอร์เมียน - คาร์บอนิเฟอรัส กำหนดเป็นขอบเขตที่ไม่มีน้ำไหลผ่าน

4. ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวราบ (Hydraulic Conductivity; K_h) ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage Parameter: S_s และ S_y) ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการสูบน้ำทดสอบ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2552) โดยมีอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวตั้งต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวราบ (K_v/K_h) เท่ากับ 1:4 และคำนวณเปรียบเทียบกับโดยใช้ทฤษฎี Cooper and Jacob

5. ขอบเขตแม่น้ำ (River Package) ข้อมูลที่ใช้ ได้แก่ ข้อมูลระดับน้ำ (River Stage) และภาพตัดขวางแม่น้ำยม

6. ระดับน้ำบาดาลเริ่มต้น (Initial Head) จะใช้ค่าระดับน้ำบาดาลของชั้นน้ำนั้นๆ ที่วัดได้ในสนามในจากบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ในพื้นที่ศึกษา

7. อัตราการเพิ่มเติมน้ำ (Recharge Rates) ประเมินอัตราการเพิ่มเติมของน้ำาลงสู่แหล่งน้ำบาดาลของพื้นที่สุโขทัยจากแบบจำลอง SWAT โดยแบ่งเป็น 6 พื้นที่ ตามหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Units, HRUs)

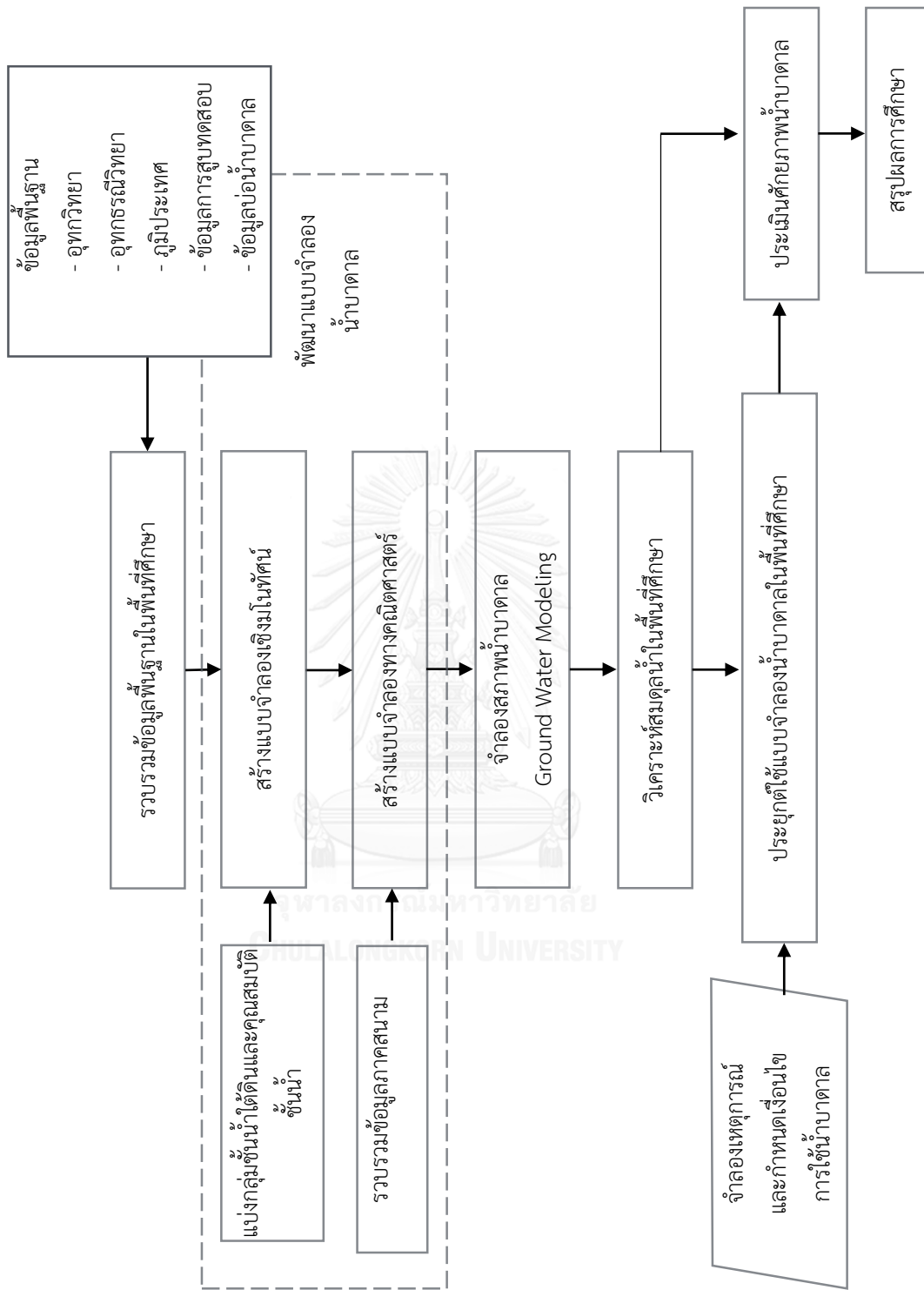
8. การคายระเหยของพืช (Evapotranspiration, Etc) ได้ทำการประเมินค่าการสูญเสียน้ำจากการระเหยและการคายน้ำของพืช โดยแบ่งพื้นที่ตามการใช้ที่ดิน ได้แก่ บริเวณพื้นที่นาข้าว และการปลูกพืชไร่

9. อัตราการใช้น้ำบาดาล (Pumping) เนื่องจากไม่มีการเก็บข้อมูลที่มีการใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ จึงต้องทำการประมาณอัตราการสูบน้ำ ซึ่งกำหนดดังนี้ ในกรณีบ่อน้ำบาดาลที่ติดตั้งเครื่องสูบน้ำโยกจะใช้น้ำบาดาล 3 - 5 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน บ่อน้ำบาดาลที่ติดตั้งเครื่องสูบน้ำไฟฟ้าหรือมีระบบประปาหมู่บ้านใช้น้ำบาดาล 20 - 30 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และบ่อน้ำบาดาลของโครงการชลประทานน้ำใต้ดินจังหวัดสุโขทัย จะใช้น้ำบาดาล 450 - 840 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2552) เพื่อกำหนดปริมาณการสูบน้ำบาดาลในแบบจำลอง

10. ปรับเทียบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคสนามจากบ่อสังเกตการณ์ โดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ซึ่งอยู่ในพื้นที่ศึกษา จำนวน 12 บ่อ

11. ประเมินศักยภาพน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัย เพื่อหาปริมาณการสูบปลอดภัย (Safe yield) โดยปริมาณที่ถูกสูบใช้ จะต้องไม่มากกว่าปริมาณน้ำที่ไหลเติมลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Recharge) โดยธรรมชาติ





รูปที่ 3-8 แผนผังการสร้างแบบจำลอง MODFLOW

3.4 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3-3 ชุดข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง ArcSWAT

ชุดข้อมูล	แหล่งที่มา	ประเภทข้อมูล
ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) - Digital Elevation Model (DEM) (Resolution 90 m) - แผนที่การใช้ที่ดิน (ปี พ.ศ. 2549) - แผนที่จำแนกชนิดของดิน	www.GMS.org กรมพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน	ข้อมูลภูมิศาสตร์
ข้อมูลภูมิอากาศ (Weather Data) - อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดรายวัน (องศาเซลเซียส) - พลังงานแสงอาทิตย์รายวัน (เมกะจูลต่อวินาที) - ความเร็วลมรายวัน (เมตรต่อวินาที) - ความชื้นสัมพัทธ์รายวัน (ร้อยละ)	กรมอุตุนิยมวิทยา	ข้อมูล MIS (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)
ข้อมูลด้านอุทกวิทยา (Hydrological Data) - ปริมาณฝนตกครายวัน (มิลลิเมตร) - ปริมาณการไหลในลำน้ำรายวัน (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)	กรมชลประทาน	ข้อมูล MIS (ปี พ.ศ. 2543 – 2556)

ตารางที่ 3-4 ชุดข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง MODFLOW

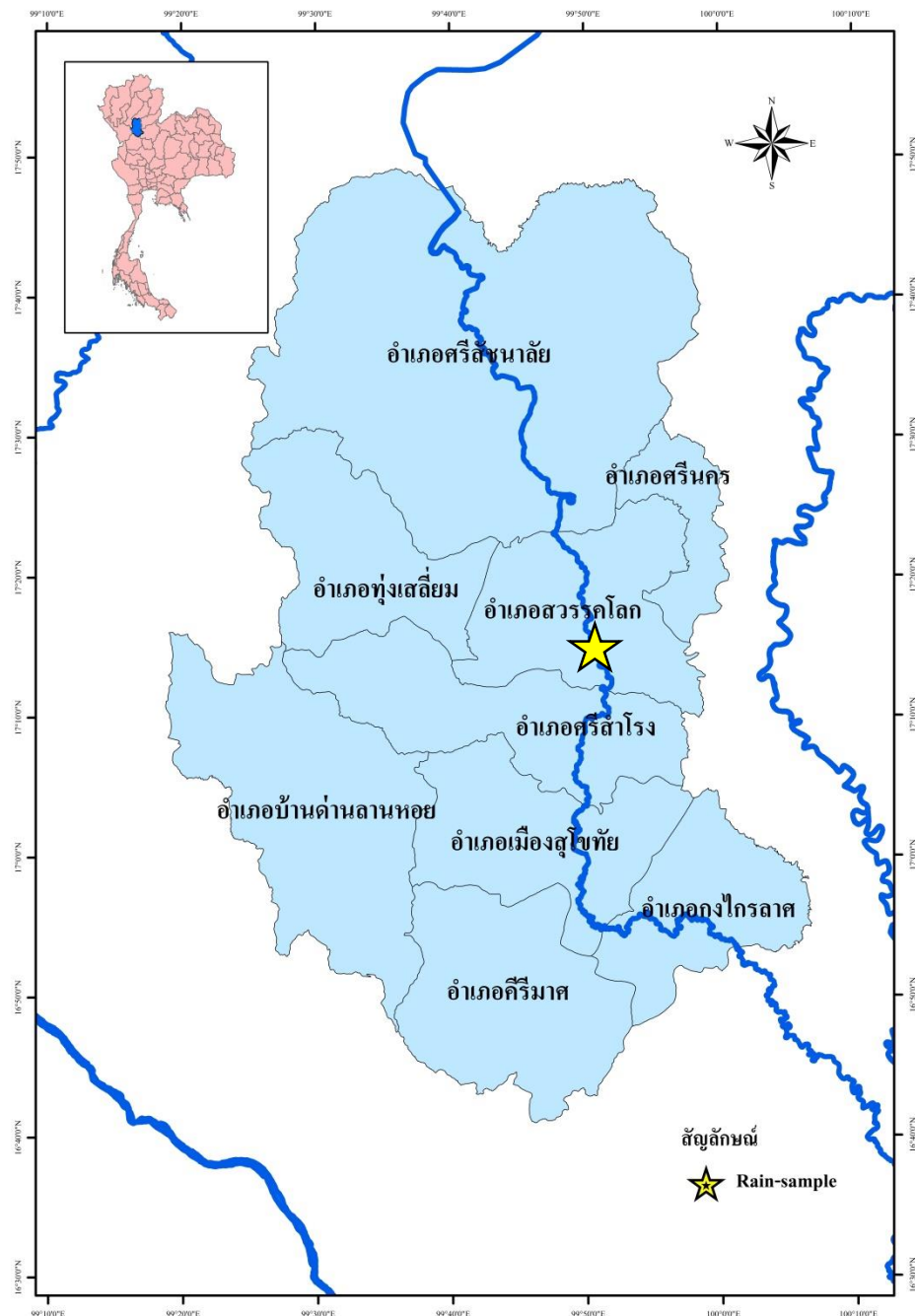
ชุดข้อมูล	แหล่งที่มา	ประเภทข้อมูล
- สภาพอุทกธรณีวิทยา	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล	รูปภาพ
- ค่าตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์ - ค่าการแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์ (D) - ค่าตัวประกอบความหน่วง (R) - ค่าความนำทางชลศาสตร์ (K) - ความพรุน (θ) - ค่าอัตราการไหลของน้ำบาดาล ณ ตำแหน่งต่างๆ	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล	ข้อมูล MIS
- ลักษณะภูมิประเทศ	www.GMS.org	ข้อมูลภูมิศาสตร์
- ข้อมูลการสูบน้ำบาดาล	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล	ข้อมูล MIS
- ความต้องการใช้น้ำในพื้นที่	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล	ข้อมูล MIS

ตารางที่ 3-5 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์อุทกวิทยาไอโซโทป

ชุดข้อมูล	แหล่งที่มา	ประเภทข้อมูล
ข้อมูลไอโซโทป ฤดูแล้ง ปี พ.ศ. 2550	TINT	ข้อมูล MIS
ข้อมูลไอโซโทปที่เคยศึกษามาแล้ว	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล	ข้อมูล MIS

4.1.1 การเก็บตัวอย่างน้ำฝน

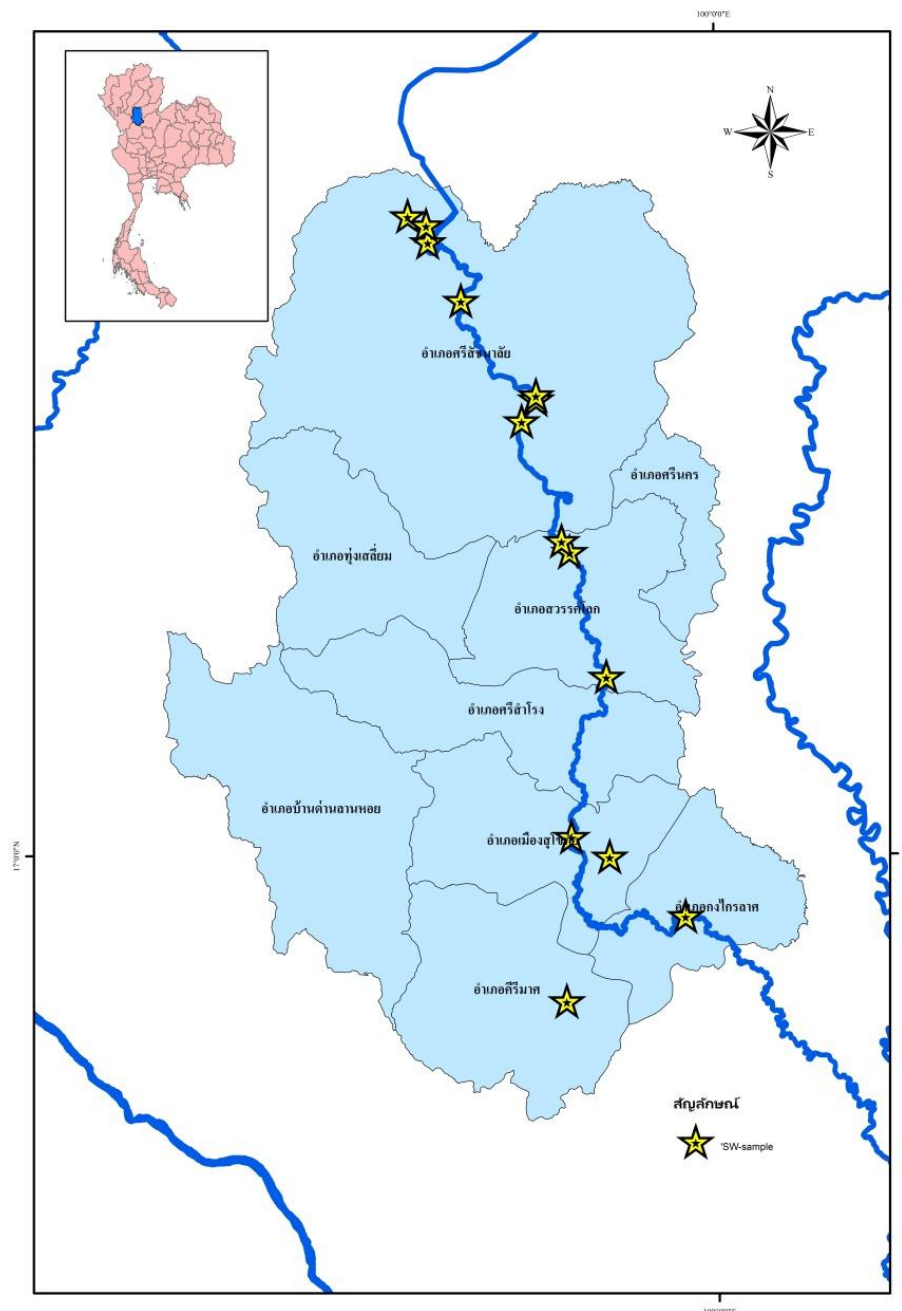
ในการศึกษาครั้งนี้ มีการบูรณาการข้อมูลไอโซโทปเสถียรน้ำฝน ปี พ.ศ. 2556 ถึง 2558 ร่วมกับสถาบันสารสนเทศน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และกรมทรัพยากรน้ำบาดาล โดยใช้ข้อมูลสถานีวัดน้ำฝนอำเภอสุวรรณคโลก จังหวัดสุโขทัย เพื่อให้วิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝนมีความแม่นยำและสมบูรณ์มากขึ้น



รูปที่ 4-2 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำฝนเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร

4.1.2 การเก็บตัวอย่างน้ำผิวดิน

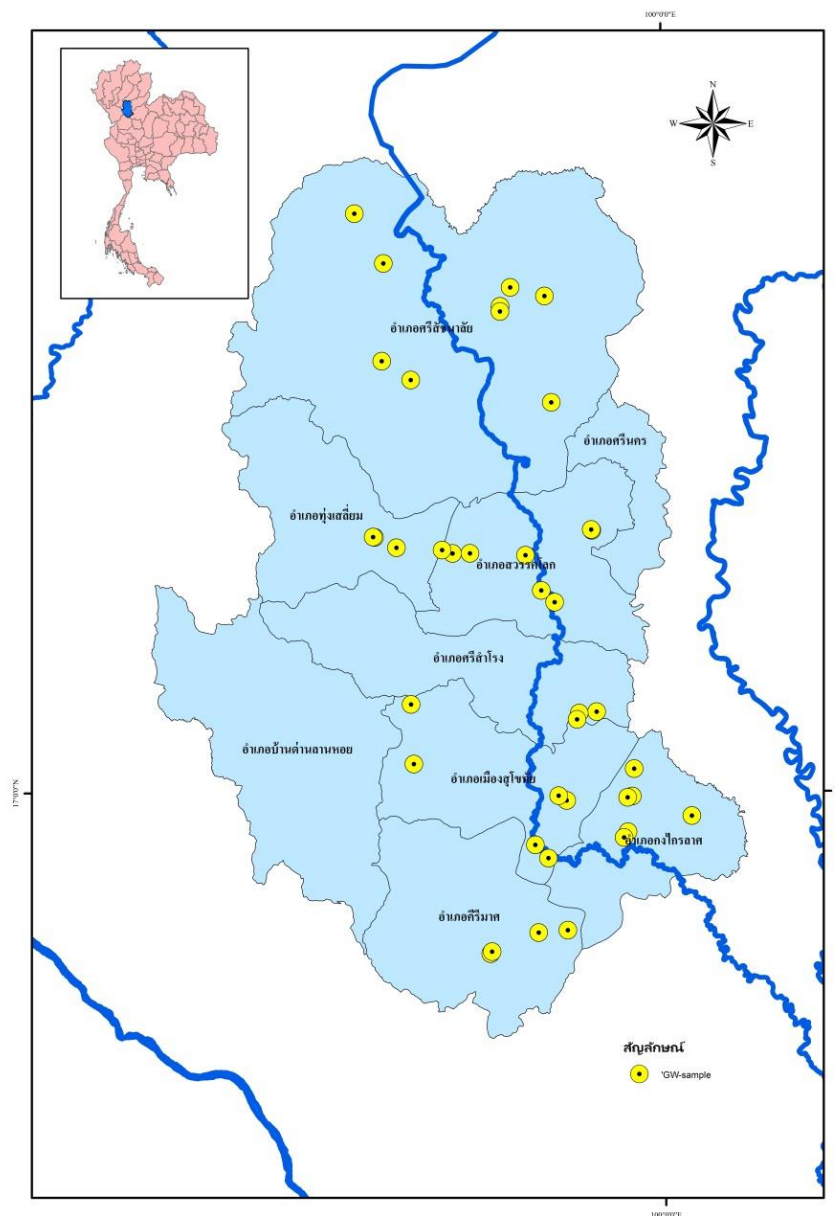
สำหรับข้อมูลน้ำผิวดิน มีการเก็บตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำยม จำนวน 14 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4-3 โดยดำเนินการเก็บในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2559 นอกจากนี้ยังมีการบูรณาการข้อมูลร่วมกับ สถาบันสารสนเทศน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)



รูปที่ 4-3 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำผิวดินเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร

4.1.3 การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล

สำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัยครั้งนี้ ได้เก็บตัวอย่างน้ำจากพิกัดบ่อเก็บตัวอย่างเดิม ซึ่งเคยเก็บตัวอย่างน้ำไว้ จากโครงการ THA8015 ดำเนินการโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล เมื่อปี พ.ศ. 2550 ถึง 2551 และโครงการศึกษาทดลองการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลจังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2555 รวมทั้งมีการเก็บตัวอย่างเพิ่มเติม นอกเหนือไปจากพิกัดเดิมอีกบางส่วน รวมจำนวนตัวอย่างน้ำบาดาล เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร (δD - $\delta^{18}O$) ทั้งสิ้นจำนวน 31 ตัวอย่าง ดังแสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่าง ดังรูปที่ 4-4

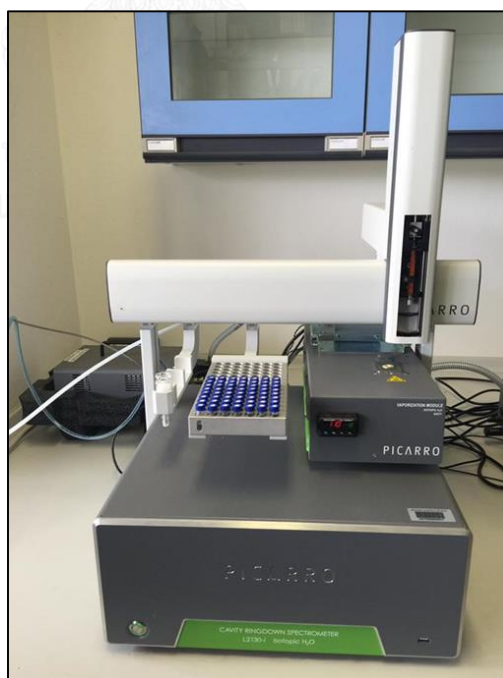


รูปที่ 4-4 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร

4.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำ

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้รับความอนุเคราะห์การเข้าใช้ห้องปฏิบัติการอุทกวิทยาไอโซโทป (Isotope Hydrology Laboratory) จากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำ (δD - $\delta^{18}O$) โดยใช้เครื่อง Isotope Ratio Mass Spectrometry ซึ่งมีกระบวนการวิเคราะห์ที่ไอโซโทปโดยการยิงแสงเลเซอร์ผ่านตัวกลาง (Craig, 1961) ในที่นี้สารตัวกลางคือ ตัวอย่างน้ำที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง ปริมาณ 0.002 ไมครอน เมื่อแสงผ่านโมเลกุลของน้ำ ที่มีมวลโมเลกุลของไฮโดรเจน หรือออกซิเจนที่ต่างกัน ส่งผลให้ลำแสงที่ผ่านตัวอย่างเกิดการเลี้ยวเบนต่างกัน ซึ่งในลักษณะที่กล่าวมานั้น ทำให้ทราบค่าสัดส่วนไอโซโทปของธาตุนั้นๆได้

การวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องทดลองครั้งนี้ ใช้ตัวอย่างน้ำจากน้ำมาตรฐานที่ทะเลเวียนนา ประเทศออสเตรีย เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบแบบจำลอง ทั้งในช่วงก่อน ช่วงกลาง และช่วงท้าย รวมทั้งสิ้น 8 ตัวอย่าง เมื่อรวมกับตัวอย่างน้ำที่เก็บจากพื้นที่จังหวัดสุโขทัย 45 ตัวอย่าง จะได้จำนวนตัวอย่างน้ำที่วิเคราะห์ในห้องทดลอง 53 ตัวอย่าง และแต่ละตัวอย่างนั้น จะทำการทดลอง 6 รอบ รวมทั้งสิ้น 336 รอบ ซึ่งแต่ละรอบนั้นใช้เวลาวิเคราะห์ 8.7 นาที และทำการปล่อยคลื่นแสงเพื่อวิเคราะห์ไอโซโทปเสถียร ทุกๆ 5 วินาที หลังจากนั้นจะทำการสอบเทียบกับอัตราส่วนไอโซโทปของน้ำมาตรฐานเพื่อเพิ่มมาตราส่วน (Scale) ของสัดส่วนองค์ประกอบไอโซโทปเสถียร ให้ง่ายต่อการวิเคราะห์มากขึ้น ในรูป δ -notation (‰)



รูปที่ 4-5 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำ

4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝน

4.3.1 องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝนรายปี

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความเชื่อมโยงทางศาสตร์ระหว่างน้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝน ณ สถานีสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำฝน ในช่วงเวลาต่างๆระหว่าง พ.ศ. 2556 ถึง 2558 แสดงผลค่า (δD - $\delta^{18}O$) ในตารางที่ 4-1 ดังนี้

ตารางที่ 4-1 ปริมาณฝน ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝนในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

ปริมาณฝน ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ พื้นที่จังหวัดสุโขทัย				
ปี พ.ศ.	ปริมาณฝน(ม.ม.)	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	(δD และ $\delta^{18}O$)
2556	597.5	87%	29	-27.52‰ และ -4.54‰
2557	1182.3	88%	30	-48.21‰ และ -7.11‰
2558	986.8	75%	28	-46.83‰ และ -6.98‰

จากตารางข้างต้น พบว่า ปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่ มีอิทธิพลโดยต่อค่าไอโซโทปเสถียรน้ำฝน กล่าวคือ ในช่วงปีใดที่มีปริมาณฝนตกมาก (ปี พ.ศ. 2557) จะส่งผลให้องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร (δD - $\delta^{18}O$) ลดลง (Depleted) กว่าปีอื่นๆ เนื่องจากในปีนั้นมีปริมาณฝนตก มากกว่าปีอื่นๆ ปริมาณไอโซโทปหนักของความชื้นในอากาศจะควบแน่นกลายเป็นฝนในช่วงเริ่มต้น หากฝนตกต่อเนื่องหรือตกหนักมาก ปริมาณไอโซโทปเบาจะถูกควบแน่นการเป็นฝนเช่นกัน ทำให้ค่าสัดส่วนไอโซโทปเสถียรมีค่าลดลงมาก

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน ช่วงฤดูแล้ง จังหวัดสุโขทัย

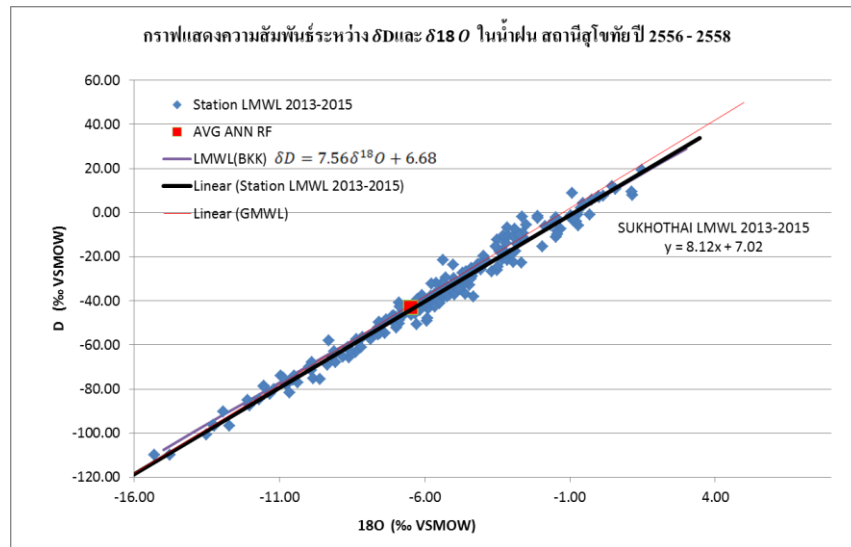
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน ช่วงฤดูแล้ง ณ สถานีสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย				
ปี พ.ศ.	δD	$\delta^{18}O$	d(excess)	LMWL
2556	-21.99‰	-3.91‰	8.86	$\delta D = 7.89\delta^{18}O + 8.66$
2557	-12.99‰	-3.12‰	5.26	$\delta D = 5.85\delta^{18}O + 5.26$
2558	-23.41‰	-4.39‰	12.22	$\delta D = 8.12\delta^{18}O + 12.22$

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร δD และ $\delta^{18}O$ สามารถหาความสัมพันธ์เชิงเส้นในรูปแบบ $\delta D = a\delta^{18}O + d$ โดยค่าความชัน (a) บ่งบอกปริมาณความชื้น และค่าดิวทีเรียมส่วนเกิน (d) บ่งบอกลักษณะการระเหย และแหล่งกำเนิดความชื้น ดังแสดงผลในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน ช่วงฤดูฝน จังหวัดสุโขทัย

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน ช่วงฤดูฝน ณ สถานีสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย				
ปี พ.ศ.	δD	$\delta^{18}O$	d(excess)	LMWL
2556	-47.1‰	-6.98‰	7.44	$\delta D = 7.81\delta^{18}O + 7.44$
2557	-56.18‰	-8.07‰	7.20	$\delta D = 7.85\delta^{18}O + 7.20$
2558	-38.12‰	-5.65‰	10.89	$\delta D = 8.67\delta^{18}O + 10.89$

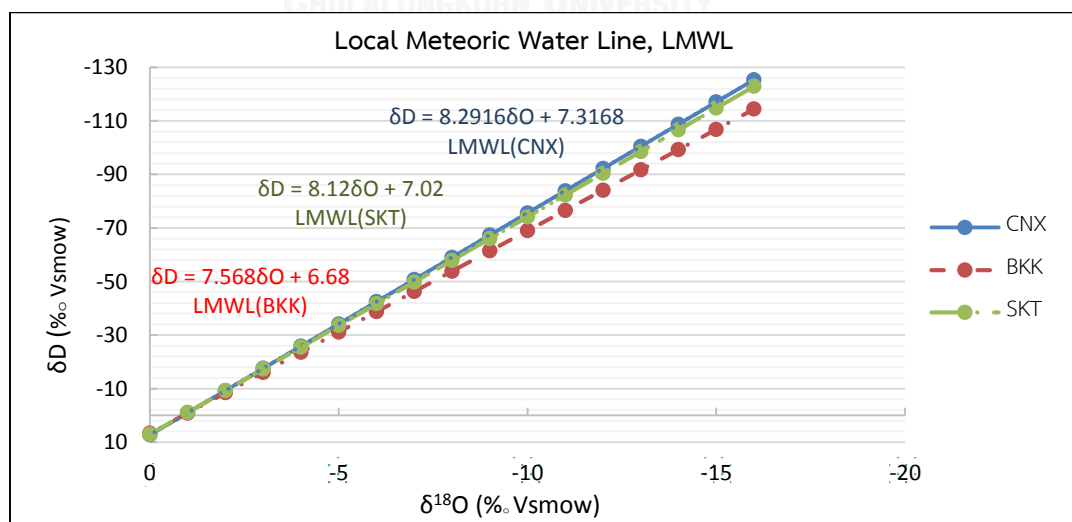
ตารางที่ 4-3 แสดง องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝนในช่วงปีต่างๆ มีลักษณะเฉพาะและแตกต่างกันออกไปในแต่ละปี เกิดอิทธิพลจากสภาวะทางอุตุนิยมวิทยาที่แตกต่างกันในแต่ละปี อีกทั้งในฤดูต่างๆ ยังส่งผลให้องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝนมีค่าแตกต่างกันด้วย ตาราง 4-1 และ 4-3 พบว่า ค่าสัดส่วนองค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน ($\delta D - \delta^{18}O$) ในฤดูฝนจะต่ำกว่า (Depleted) สัดส่วนองค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝนในฤดูแล้ง โดยลักษณะดังกล่าว มีอิทธิพลจากปริมาณฝนที่ตกมาก ทำให้สัดส่วนองค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝนต่ำ อีกทั้งยังมีอิทธิพลจากอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา ช่วงเวลาใดที่มีอุณหภูมิที่สูงกว่า จะส่งผลให้สัดส่วนองค์ประกอบไอโซโทปมีค่าต่ำลง (Depleted) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยด้านอุณหภูมิยังมีอิทธิพลไม่มากนัก ในพื้นที่ภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน (Tropical Monsoon) ดังเช่นประเทศไทย ซึ่งสามารถอธิบายได้โดย Local Meteoric Water Line (LMWL) จากกราฟระหว่าง ($\delta D - \delta^{18}O$) ดังรูปที่ 4-9 ถึง 4-11 ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างขององค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำฝน ในช่วงฤดูต่างๆ เช่น ในปี 2558 มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ คือ $\delta D = 7.56\delta^{18}O + 6.68$ จากสมการดังกล่าว พบว่า ค่าความชัน (7.56) และ d-excess เท่ากับ 6.68 ในฤดูฝน มีค่าเบี่ยงเบนจาก Global Meteoric Water Line (GMWL) ตามทฤษฎีของ (Craig, 1961) ซึ่งเท่ากับ 8 และ 10 ตามลำดับ โดยสรุปได้ว่า ค่า d-excess ที่มีค่าต่ำกว่า GMWL นั้น เป็นผลจากอิทธิพลจากความชื้นในอากาศสูง



รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ น้ำฝน สถานีสุโขทัย ปี พ.ศ. 2556-2558

รูปที่ 4-6 แสดงการสร้างเส้นน้ำบรรยากาศพื้นที่จังหวัดสุโขทัย (Local Meteoric Water Line) โดยใช้ข้อมูลประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝนปี พ.ศ. 2556-2558 เพื่อสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ ซึ่งมีความสัมพันธ์เท่ากับ $\delta D = 8.12\delta^{18}O + 7.02$ เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นน้ำบรรยากาศโลก(Global Meteoric Water Line) ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นเท่ากับ $\delta D = 8.10\delta^{18}O + 10$ พบว่าจังหวัดสุโขทัยมีค่าความชันเชิงเส้นใกล้เคียงกับค่าความชันเฉลี่ยโลก กล่าวคือปริมาณความชื้นสัมพัทธ์จังหวัดสุโขทัยใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศโลก

4.3.2 องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝน จังหวัดสุโขทัย เชียงใหม่ และกรุงเทพมหานคร

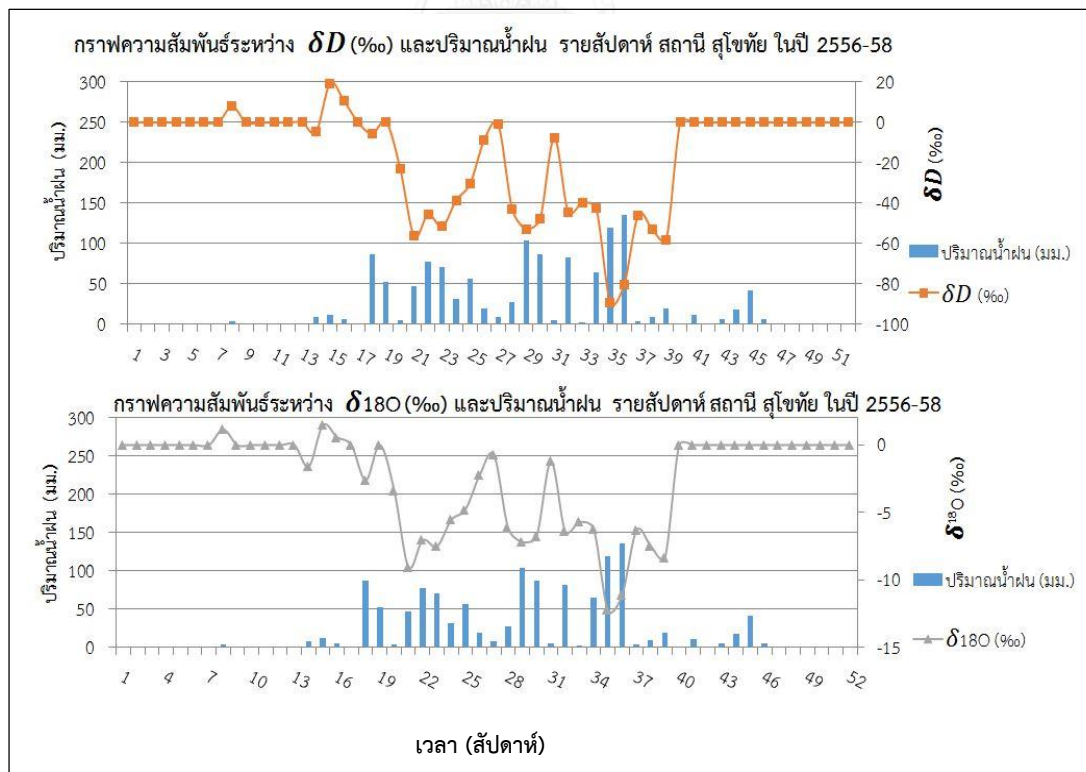


รูปที่ 4-7 การเปรียบเทียบเส้น Local Meteoric Water Line (LMWL)

จากรูปที่ 4-7 เมื่อเปรียบเทียบ Local Meteoric Water Line (LMWL) ของสุโขทัย กรุงเทพมหานคร และเชียงใหม่ พบว่า ค่าความชันของ LMWL สุโขทัยและเชียงใหม่ใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่ากรุงเทพมหานคร แสดงว่า ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัยและเชียงใหม่ มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าพื้นที่กรุงเทพมหานคร และค่า Dueterium Excess ของพื้นที่สุโขทัยและเชียงใหม่ มีค่าสูงกว่าพื้นที่กรุงเทพมหานคร แสดงว่า ความชื้นที่ทำให้เกิดฝนในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ถูกพัดพาจากบริเวณที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าแหล่งกำเนิดฝนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และแหล่งกำเนิดของฝนที่ตกในพื้นที่สุโขทัยและเชียงใหม่ มีลักษณะใกล้เคียงกัน อาจกล่าวได้ว่า สุโขทัย มีปริมาณการระเหยของน้ำผิวดินในพื้นที่มากกว่ากรุงเทพมหานคร ลักษณะของฝนในสุโขทัยและเชียงใหม่เป็นฝนบก ซึ่งเกิดจากกลุ่มความชื้นที่ระเหยจากแหล่งน้ำผิวดิน และลักษณะของฝนในกรุงเทพมหานครเป็นลักษณะของฝนทะเล

4.3.3 องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝนรายสัปดาห์

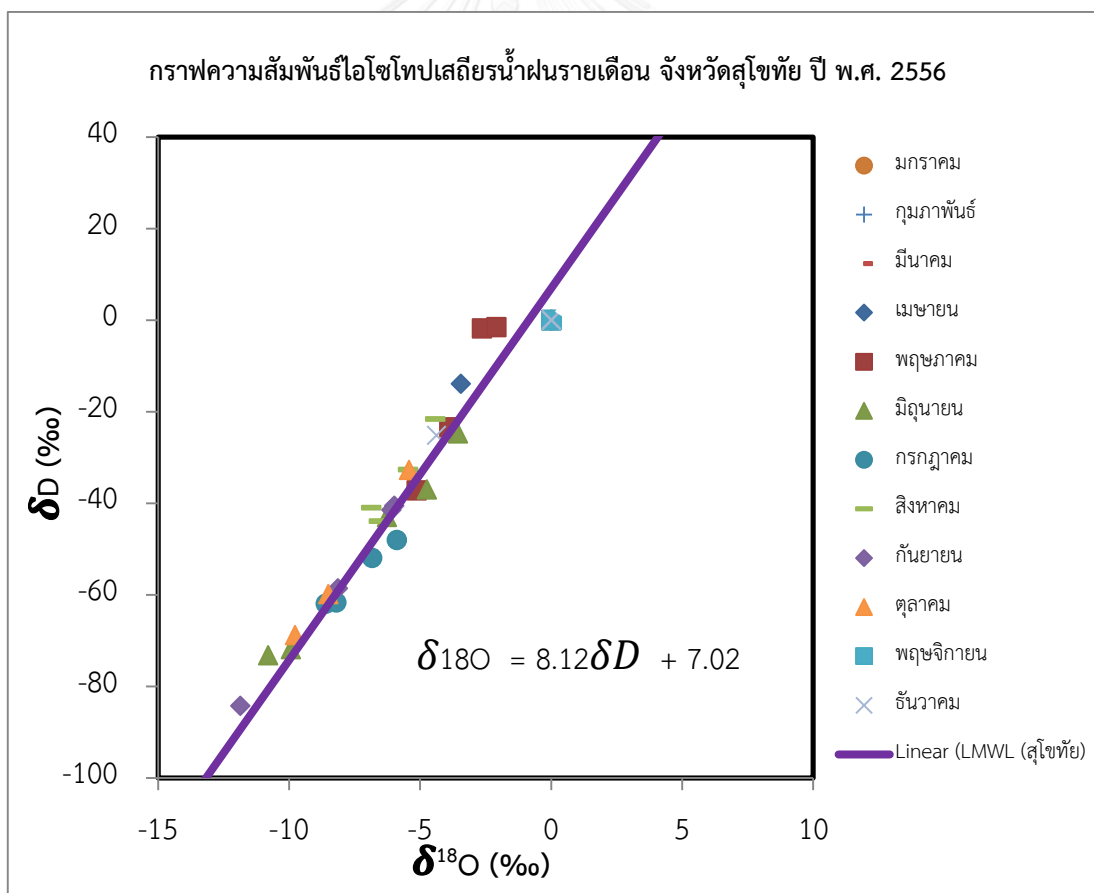
ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝน ในช่วงเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-8 กราฟ δD และ $\delta^{18}O$ น้ำฝน รายสัปดาห์ สถานีสุโขทัย ปี พ.ศ. 2556

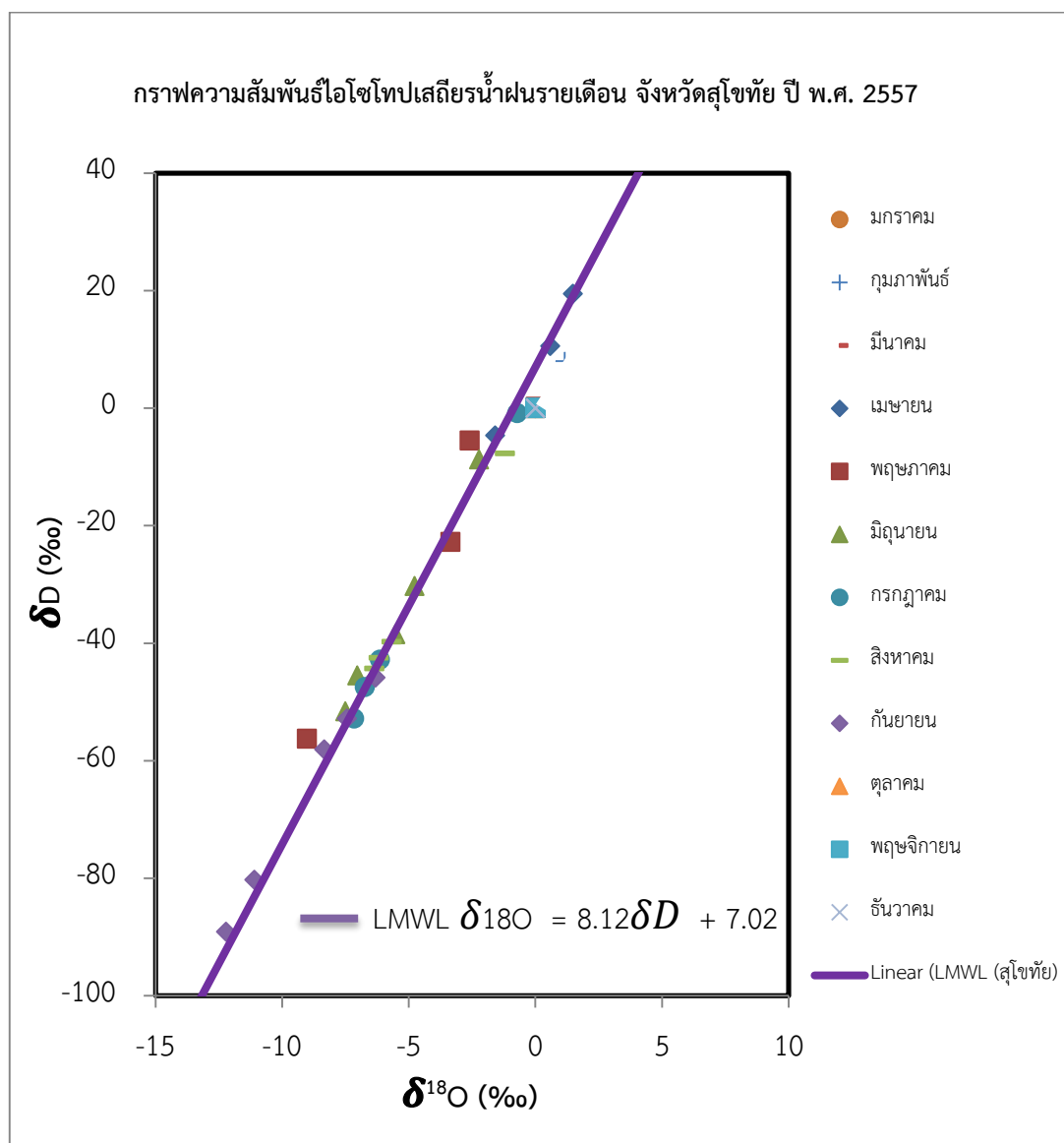
รูปที่ 4-8 พบว่า ค่า δD และ $\delta^{18}O$ ในช่วงต้นปี ค่าไอโซโทปน้ำฝนจะมีค่าสูง เนื่องจากปริมาณฝนตกในช่วงนั้นน้อย และฝนจะเกิดจากการพาความร้อนจากลมตะวันออกเฉียงเหนือ เมื่อถึงเดือนมิถุนายน เริ่มย่างเข้าสู่ฤดูฝนและมีฝนตกมาก ส่งผลให้ค่าไอโซโทปลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด และจะเพิ่มขึ้นเป็นปกติ ในช่วงปลายเดือนมิถุนายน (สัปดาห์ที่ 3) ถึงกลางเดือนกรกฎาคม หลังจากนั้นค่าไอโซโทปของน้ำฝนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเดือนกันยายน เนื่องจากมีฝนตกหนักในพื้นที่ (Amount Effect) ประกอบกับมีลมพายุหมุนเขตร้อนพัดผ่าน สัดส่วนองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝนจะเพิ่มขึ้นเป็นปกติเมื่อเข้าสู่ฤดูหนาว เนื่องจากการพาความร้อนขึ้นจากอิทธิพลของลมตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้ค่าไอโซโทปเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับช่วงก่อนฤดูมรสุม ตามรายงานของกรมอุตุนิยมวิทยา

4.3.4 องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝนรายเดือน



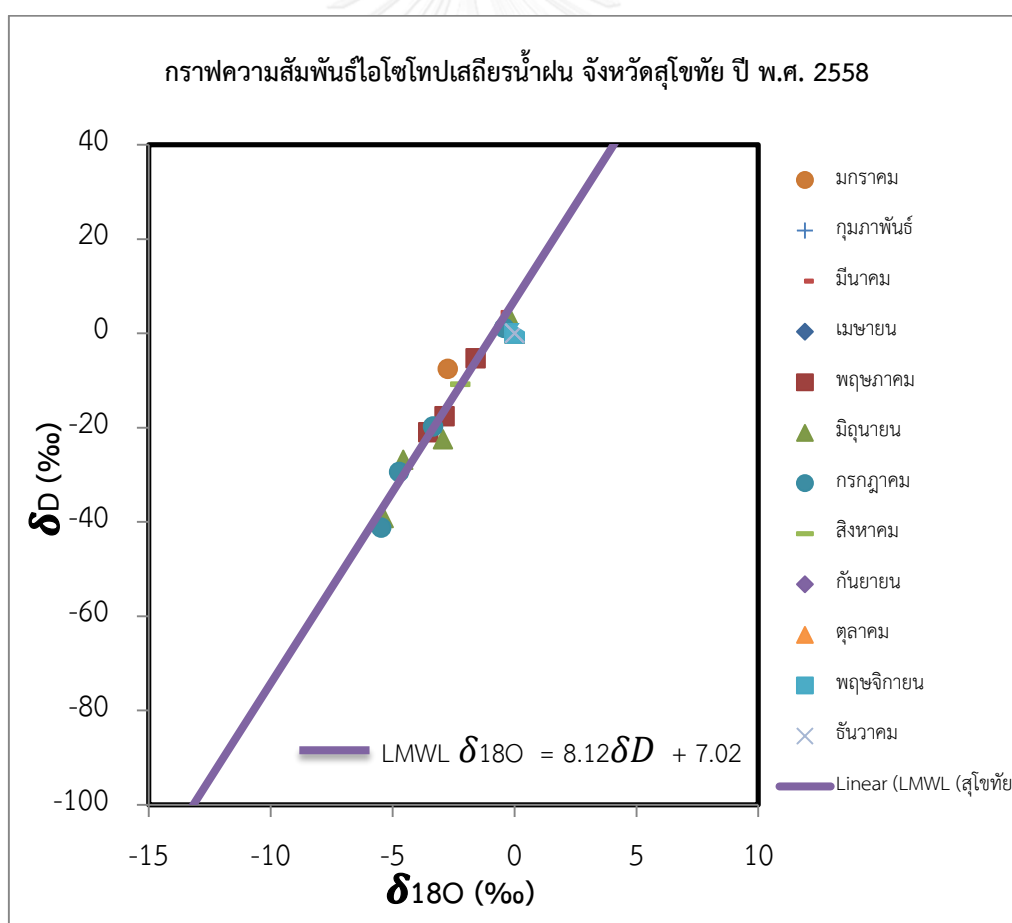
รูปที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ ในน้ำฝน จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2556

รูปที่ 4-9 แสดงการศึกษาองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำฝนปี พ.ศ. 2556 ในรูปที่ 4-8 สรุปได้ว่า ค่าองค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน (δD - $\delta^{18}O$) อยู่ในช่วง 0 ‰ ถึง -80 ‰ อีกทั้งยังพบว่า ไอโซโทปมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยที่ในช่วงฤดูแล้ง จะมีค่า (δD - $\delta^{18}O$) สูงกว่า (Enriched) ฤดูฝน เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละเดือนจะพบว่า ในช่วงต้นฤดูฝนจะมีค่าไอโซโทปสูงกว่าช่วงปลายฤดู เนื่องจากในช่วงต้นฤดูฝน โมเลกุลของไอโซโทปหนักของไอน้ำจะกลั่นตัวเป็นฝนก่อนโมเลกุลเบา



รูปที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ ในน้ำฝน จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2557

จากรูปที่ 4-10 แสดงการศึกษาองค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝนปี พ.ศ. 2557 สรุปได้ว่า องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน (δD - $\delta^{18}O$) อยู่ในช่วง 20 ‰ ถึง -90 ‰ อีกทั้งยังพบว่า ในช่วงฤดูแล้ง จะมีค่า (δD - $\delta^{18}O$) สูงกว่า (Enriched) ฤดูฝน เมื่อเปรียบเทียบกับปี พ.ศ. 2556 การกระจายตัวของ องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝนจะมากกว่าปีที่ผ่านมา เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละเดือนจะพบว่า ในช่วงต้น ฤดูฝนปี พ.ศ. 2557 จะมีค่าไอโซโทปสูงกว่าปี พ.ศ. 2556 สันนิษฐานได้ว่า ปี พ.ศ.2557 จะมีความชื้นที่ ถูกพัดพาจากลมตะวันตกเฉียงใต้เข้าสู่พื้นที่มากกว่าปี พ.ศ. 2556 และช่วงปลายฤดูฝน ปี พ.ศ. 2557 ค่าองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำฝนต่ำกว่าปี พ.ศ. 2556 สันนิษฐานว่า ในช่วงเวลาดังกล่าว ปี พ.ศ. 2557 มีปริมาณฝนตกในพื้นที่ มากกว่า ปี พ.ศ. 2556 ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณฝนที่ตกจริงในพื้นที่ ในปี พ.ศ. 2557 และ 2556 มีปริมาณฝน 1,182.3 มิลลิเมตร และ 597.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ ในน้ำฝน จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2558

รูปที่ 4-11 แสดงการศึกษาขององค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝนปี พ.ศ. 2558 สรุปได้ว่า ค่าองค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน (δD - $\delta^{18}O$) อยู่ในช่วง 0 ‰ ถึง -40 ‰ ในช่วงต้นฤดูฝน องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝนปี พ.ศ. 2558 มีค่าต่ำกว่าปี พ.ศ. 2556 และ 2557 อาจเป็นผลจากปี พ.ศ. 2558 เข้าสู่ฤดูฝนเร็วกว่าปีก่อนหน้า ซึ่งสอดคล้องกับสถิติการประกาศเข้าสู่ฤดูฝนของกรมอุตุนิยมวิทยา

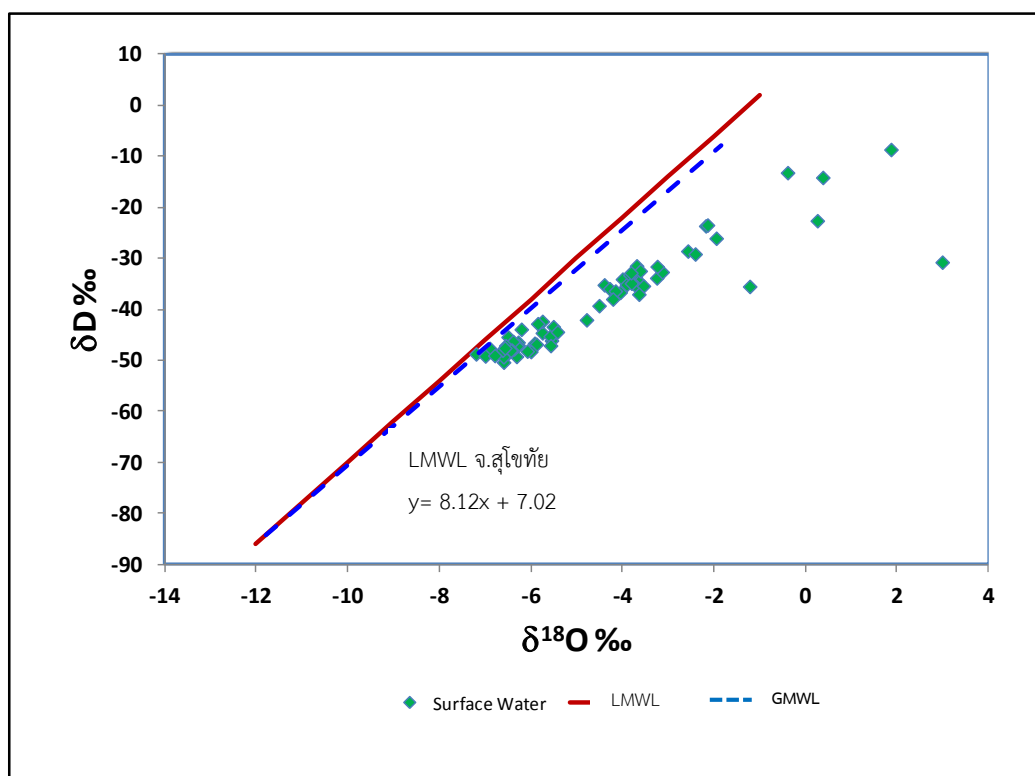
จากการศึกษาองค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน ในช่วงปี พ.ศ. 2556 ถึง 2558 สรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบน้ำฝน มีผลจากอิทธิพลของปริมาณฝน และอุณหภูมิ ซึ่งในพื้นที่ศึกษา ปัจจัยแรกจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยปัจจัยหลัง เนื่องจากสุโขทัยอยู่ในสภาพภูมิอากาศแบบมรสุม อีกทั้งยังพบว่า ในช่วงฤดูแล้ง จะมีค่า (δD - $\delta^{18}O$) สูงกว่า (Enriched) ในช่วงฤดูฝน เนื่องจากอิทธิพลของปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ หรือไอน้ำที่เกิดจากการระเหยของแหล่งน้ำผิวดินในพื้นที่ ส่งผลให้เกิดฝนที่ตกในพื้นที่ ในทางกลับกัน องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝนในช่วงฤดูฝน จะเกิดจากเมฆที่พัดมาจากนอกพื้นที่ ทำให้มีสัดส่วนองค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝนในช่วงฤดูฝนต่ำกว่า (Depleted) ในช่วงฤดูแล้งนั่นเอง

4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดิน

เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว 3 องค์ประกอบพื้นฐาน ที่เกิดขึ้นหลังจากฝนตก ได้แก่ การไหลของน้ำท่า (Surface Runoff) การไหลของน้ำในชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น (Interflow) และการไหลพื้นฐานของชั้นน้ำบาดาล (Base Flow) ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวข้างต้น จะไหลลงสู่แม่น้ำลำคลอง (River Water) จากลักษณะดังกล่าว ทำให้เกิดความคล้ายคลึงขององค์ประกอบไอโซโทปเสถียร และสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของการไหลในลำน้ำ จากแหล่งต่างๆ เช่น น้ำท่า และน้ำบาดาล

ในการศึกษาองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำท่าในครั้งนี้ ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำผิวดินในลำน้ำยม ลำน้ำสาขา และคลองชลประทาน ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2559 จำนวน 14 ตัวอย่าง และได้รับการวิเคราะห์ข้อมูลไอโซโทปน้ำผิวดิน จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล สถาบันสารสนเทศน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน) เพื่อนำมาประมวลวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำผิวดิน จากการศึกษาพบว่า ค่า δD ของน้ำผิวดินในกลุ่มน้ำยม อยู่ระหว่าง -50.19 ‰ ถึง -8.49 ‰ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $-39.25 \text{ ‰} \pm 9.62 \text{ ‰}$ และค่า $\delta^{18}O$ อยู่ระหว่าง 7.2 ‰ ถึง 2.99 ‰ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $-4.61\% \pm 2.19 \%$ เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ จะได้ความสัมพันธ์

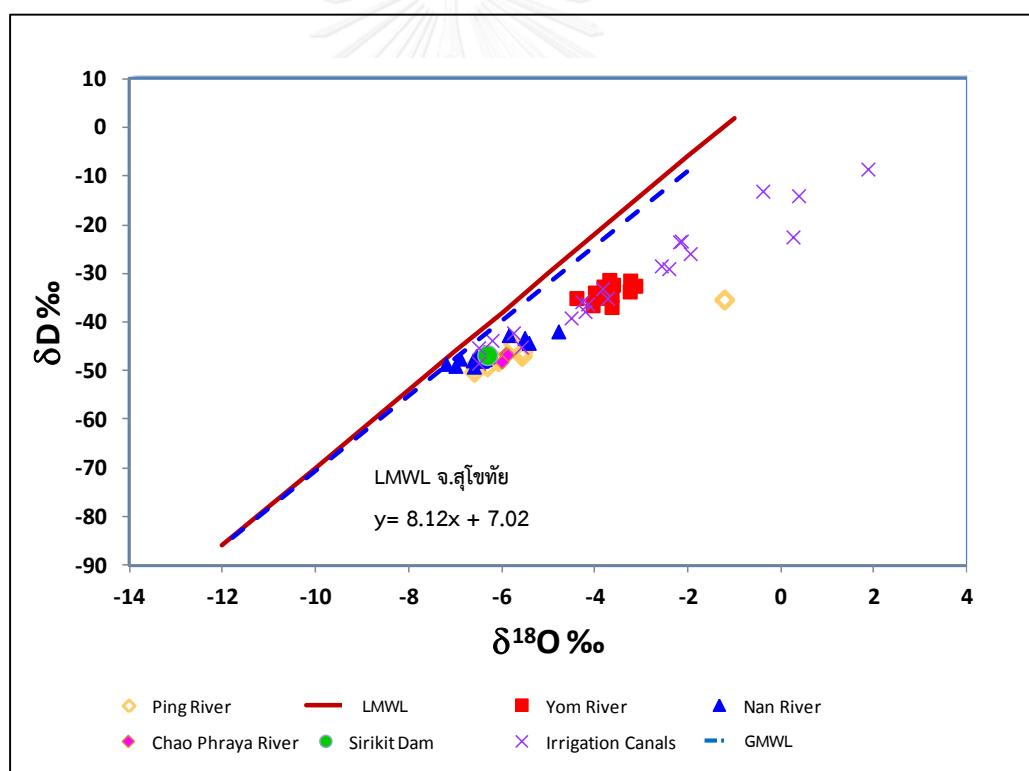
เชิงเส้น $\delta D = 4.024\delta^{18}O + 20.72$ ดังแสดงในรูปที่ 4-11 จากรูปพบว่าองค์ประกอบไอโซโทปของน้ำผิวดิน มีความชื้นต่ำกว่าเส้น LMWL อย่างชัดเจน แสดงอิทธิพลจากการระเหย ซึ่งเป็นผลจากปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำผิวดินเกิดขึ้น รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ ยังส่งผลให้ค่าความชื้นของเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง δD และ $\delta^{18}O$ ของน้ำผิวดิน ซึ่งมี (ค่าความชื้น 4.02) ต่ำกว่าเส้น Global Meteoric Water Line (GMWL) (ค่าความชื้น 8) และเส้น Local Meteoric Water Line (LMWL) ซึ่งมี (ค่าความชื้น 7.77 ในฤดูฝน และ 8.52 ในฤดูแล้ง)



รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดิน และ LMWL พื้นที่สุโขทัย

กระบวนการระเหยของน้ำผิวดินที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ค่า δD และ $\delta^{18}O$ สูงขึ้น เนื่องจากน้ำที่ผ่านการระเหยแล้วจะอุดมไปด้วยโมเลกุลไอโซโทปหนัก เป็นผลให้ค่าความชื้นระหว่าง δD - $\delta^{18}O$ มีค่าต่ำและอยู่ในช่วง 4 ถึง 5.5 ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ยังไม่สามารถอธิบายได้แน่ชัดว่า เป็นการระเหยของน้ำผิวดิน หรือน้ำในเขตรากพืช อีกทั้งองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำทำยังไม่สอดคล้องกับค่าไอโซโทปของน้ำฝน แสดงว่า ฝนที่ตกไม่ใช่แหล่งกำเนิดของน้ำผิวดินในพื้นที่ และน้ำในน้ำยมมี

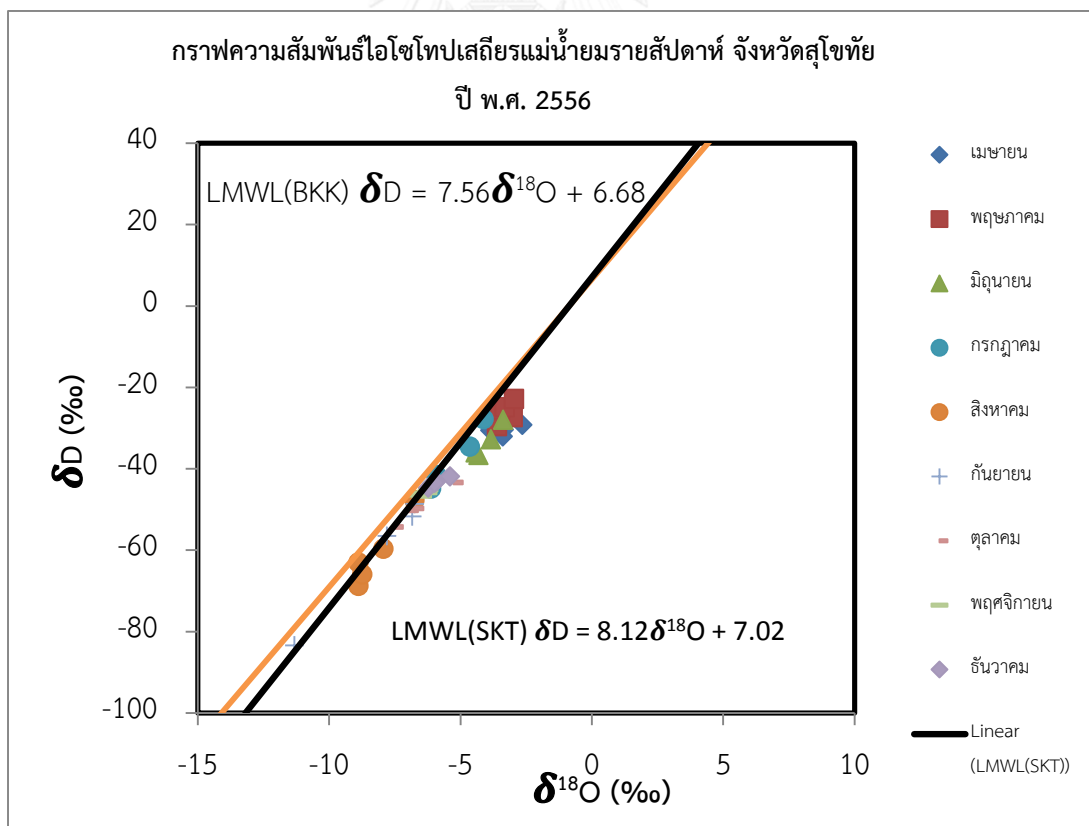
แหล่งกำเนิดหลักมาจากน้ำที่ต้นน้ำทางเหนือ เช่น น้ำที่ถูกเก็บกักในฝายอ่างเก็บน้ำ จากข้อมูลที่ได้รับ ความอนุเคราะห์จากโครงการ THA8015 กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำในช่วงฤดูแล้ง เดือน มกราคม-กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 พบว่า ในช่วงเวลาดังกล่าว องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของ ลำน้ำน่าน มีลักษณะคล้ายคลึงกับน้ำบาดาล ดังแสดงในรูป 4-13 อีกทั้งในสภาพแวดล้อมจริง มีการ ปล่อยน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ เพียงเพื่อรักษาระบบนิเวศเท่านั้น แต่ปริมาณน้ำใน ลำน้ำยังมีปริมาณลดลงเล็กน้อย สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณการไหลในแม่น้ำน่านช่วงฤดูแล้ง เกิดจาก พฤติกรรมการไหลของน้ำบาดาล หรือปริมาณการไหลพื้นฐาน (Base Flow) เป็นหลัก ในรูปของ Gaining Stream ซึ่งเป็นพฤติกรรมเชื่อมโยงทางชลศาสตร์ระหว่างน้ำผิวดินและน้ำบาดาล ซึ่งจะ กล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำในแม่น้ำสายหลัก และ LMWL พื้นที่สุโขทัย

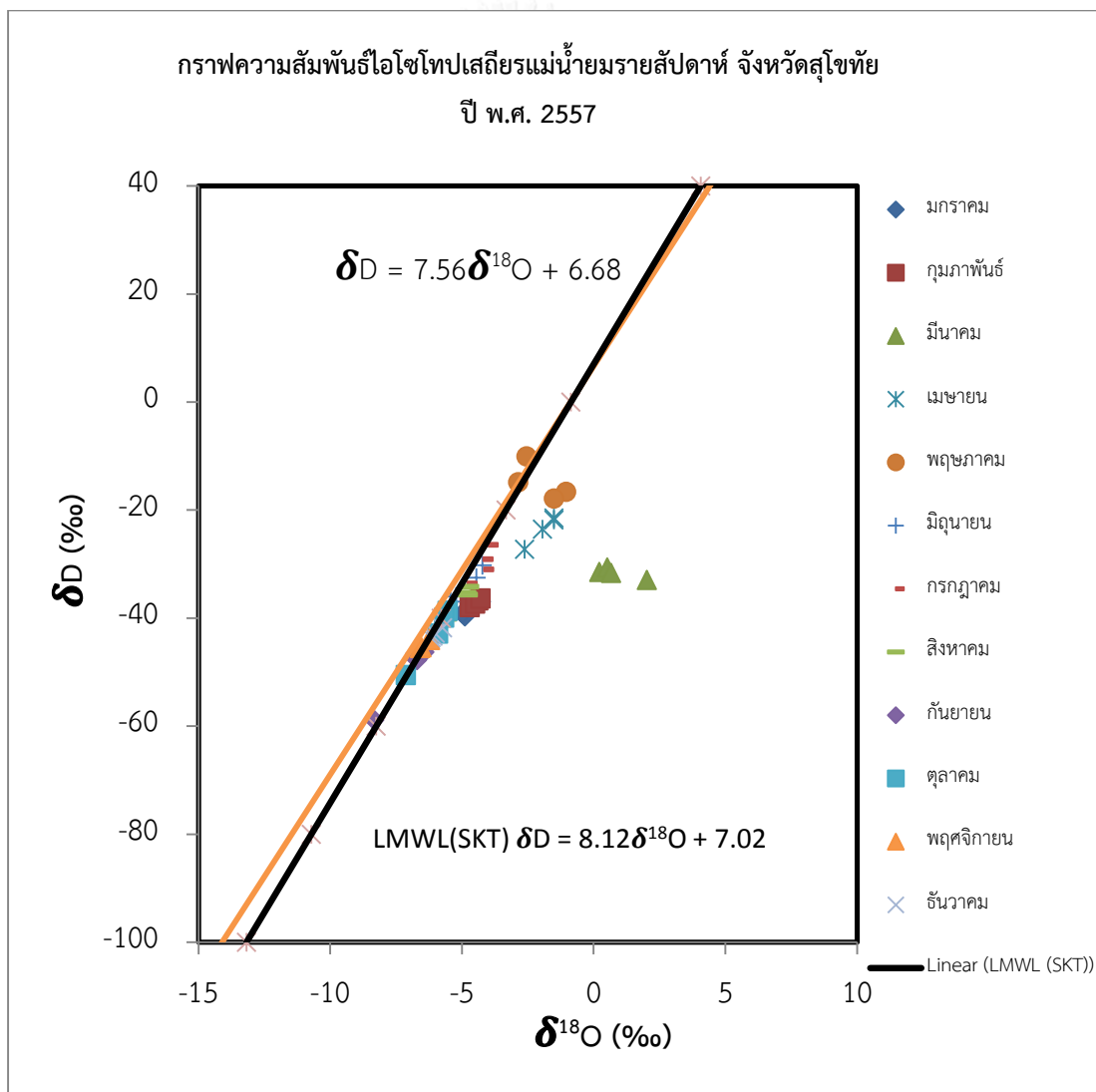
จากการเปรียบเทียบองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดิน ในแม่น้ำยม แม่น้ำปิง และแม่น้ำ น่าน ดังรูปที่ 4-12 พบว่าแม่น้ำยมมีลักษณะแตกต่างจากแม่น้ำปิง และแม่น้ำน่าน โดยค่า $\delta^{18}O$ และ δD มีค่าสูงกว่าแหล่งอื่นๆ กล่าวคือ แม่น้ำยม มีค่า $\delta^{18}O$ อยู่ในช่วง -3.13 ‰ ถึง -4.39 ‰ แม่น้ำปิง

และน่าน $\delta^{18}\text{O}$ อยู่ในช่วง -1.22‰ ถึง -6.99‰ และเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของตัวอย่างน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ พบว่ามีความคล้ายคลึงกับองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของแม่น้ำปิงและน่าน ส่วนองค์ประกอบไอโซโทปของน้ำในคลองชลประทาน มีแนวโน้มเกิดกระบวนการระเหยโดยธรรมชาติของแหล่งน้ำผิวดินตามปกติอยู่แล้ว และจากการวิเคราะห์ข้อมูลองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำผิวดิน ปีพุทธศักราช 2556 ถึง 2558 ณ สถานีอำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากสถาบันสารสนเทศน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) ดังรูปที่ 4-13 ถึง 4-14 พบว่าองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำผิวดิน ปีพุทธศักราช 2557 มีแนวโน้มการระเหยมากกว่าปีอื่นๆ เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าว น้ำในแม่น้ำยมบริเวณดังกล่าวเกิดจากน้ำผิวดินที่ไหลมาจากด้านเหนือน้ำ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของแม่น้ำยม ในพื้นที่อำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย เปรียบเทียบกับ อำเภอเมืองสุโขทัย พบว่ามีค่าสูงกว่า (Enriched) แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของแม่น้ำยม อำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย มีส่วนประกอบของน้ำบาดาลและน้ำผิวดินที่ไหลมาจากทางด้านเหนือน้ำในช่วงฤดูแล้ง



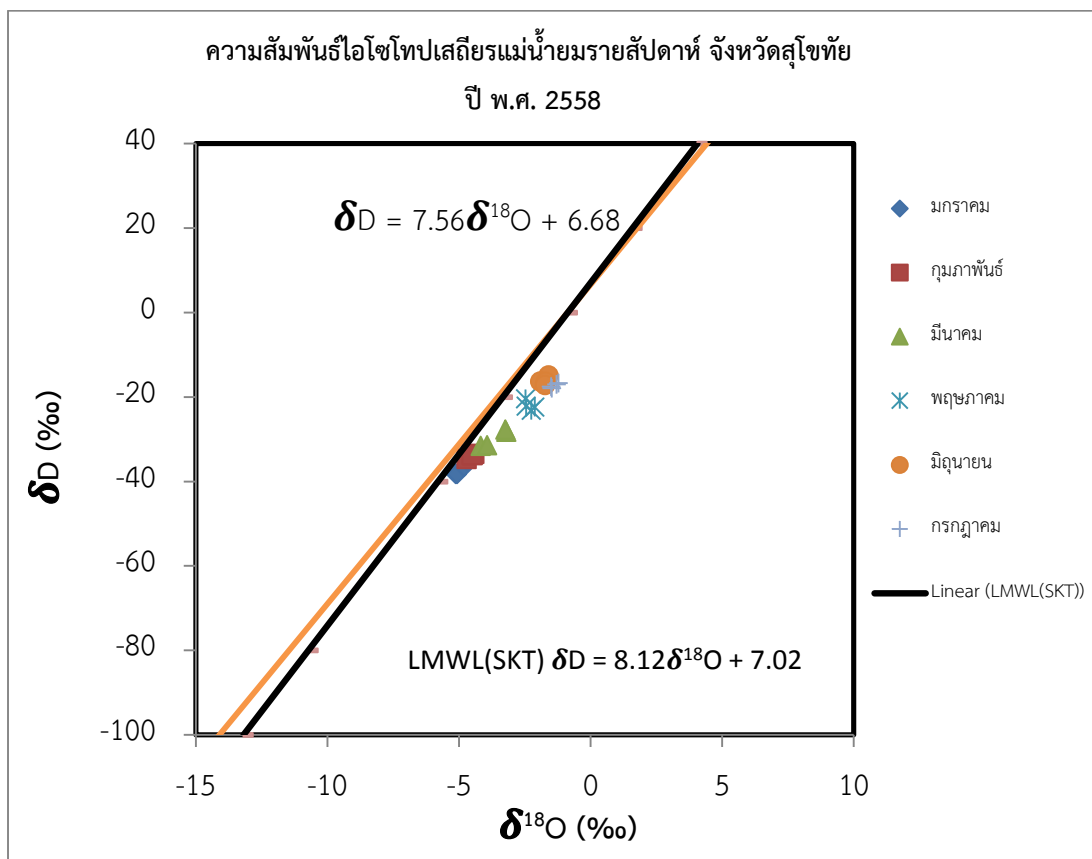
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดินในแม่น้ำยม จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2556

จากการศึกษาค่าองค์ประกอบไอโซโทปน้ำผิวดิน ในช่วงปี 2556 ค่า δD ของน้ำผิวดินในแม่น้ำยม อยู่ระหว่าง -70 ‰ ถึง -18 ‰ แนวโน้มยังสอดคล้องกับเส้นความชันของไอโซโทปน้ำฝน เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4-14 องค์ประกอบไอโซโทปน้ำฝน ในช่วงปี 2557 ค่า δD ของน้ำผิวดินในแม่น้ำยม อยู่ระหว่าง -48 ‰ ถึง -5 ‰ และมีแนวโน้มต่ำกว่าเส้นความชันของไอโซโทปน้ำฝน และในช่วงปี 2558 ค่า δD ของน้ำผิวดินในแม่น้ำยม อยู่ระหว่าง -40 ‰ ถึง -10 ‰ มีแนวโน้มต่ำกว่าเส้นความชันของไอโซโทปน้ำฝน ดังรูปที่ 4-15 ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 ช่วงเวลาดังกล่าว พบว่าน้ำในแม่น้ำยมปี พ.ศ. 2557 และ 2558 มีอิทธิพลจากกระบวนการระเหย ส่งผลให้องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำผิวดิน มีค่าสูงกว่าในปี พ.ศ. 2556



รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดินในแม่น้ำยม จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2557

รูปที่ 4-15 แสดงองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดิน ในปี พ.ศ. 2557 มีค่า δD ของน้ำผิวดินในแม่น้ำยม อยู่ระหว่าง -48 ‰ ถึง -5 ‰ และมีแนวโน้มต่ำกว่าเส้นความชันของไอโซโทปน้ำฝน ซึ่งมีอิทธิพลจากกระบวนการระเหย ทำให้องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากน้ำที่ยังไม่ระเหยอุดมไปด้วยสัดส่วนของไอโซโทปหนัก อีกนัยหนึ่ง สรุปได้ว่า น้ำในแม่น้ำยมในปี พ.ศ. 2557 ไหลมาจากน้ำทางด้านเหนือน้ำ หรือน้ำที่ถูกปล่อยจากฝายหรืออ่างเก็บน้ำ

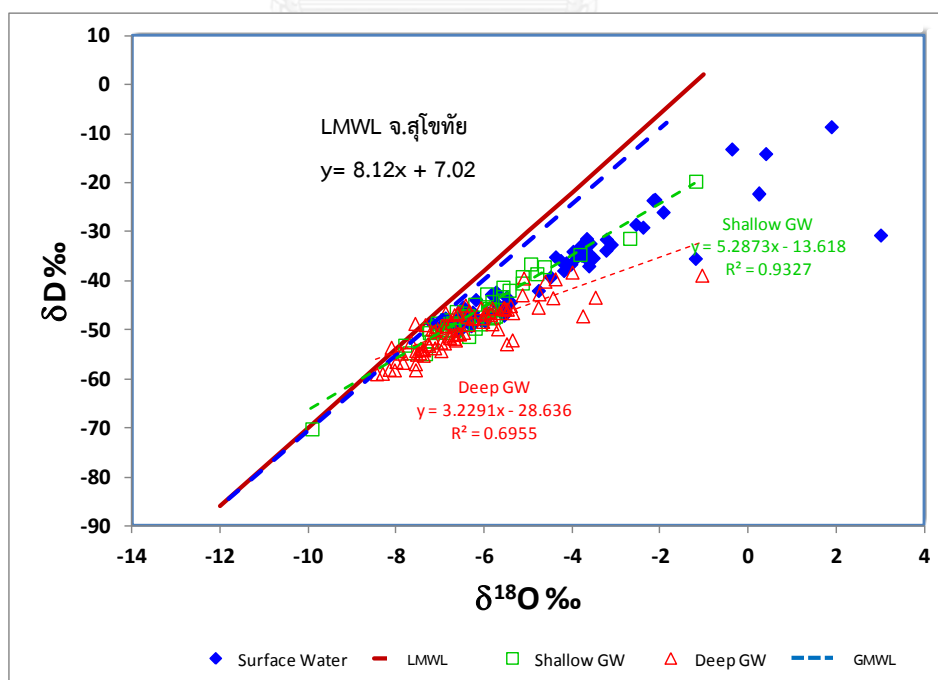


รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดินในแม่น้ำยม จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2558

รูปที่ 4-16 แสดงองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำผิวดินในปี 2558 ค่า δD ของน้ำผิวดินในแม่น้ำยม อยู่ระหว่าง -40 ‰ ถึง -10 ‰ มีแนวโน้มต่ำกว่าเส้นความชันของไอโซโทปน้ำฝน เนื่องจากปี พ.ศ. 2558 มีการเก็บตัวอย่างเฉพาะช่วงต้นปี ระหว่างเดือนมกราคมถึงมิถุนายนเท่านั้น ทำให้ยังไม่สามารถเห็นแนวโน้มได้มากนัก

4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำบาดาล

ทรัพยากรน้ำ สามารถแบ่งได้ 2 แหล่งหลักๆ คือ 1.น้ำผิวดินที่เกิดจากฝนที่ตกลงมา ไหลลงที่ลุ่ม แม่น้ำ ลำคลอง และบางส่วนซึมสู่พื้นดิน 2.น้ำบาดาล ซึ่งความสัมพันธ์ทางชลศาสตร์ระหว่างทรัพยากรน้ำทั้ง 2 แหล่ง มีความแตกต่างกันในแต่ละลุ่มน้ำ ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำนั้นๆ เช่น ปริมาณฝน ความแปรปรวนของฝน อุณหภูมิ และปริมาณการระเหย เป็นต้น รวมทั้งลักษณะการบริหารจัดการน้ำ และโครงสร้างทางชลศาสตร์ในลุ่มน้ำ เช่น เขื่อน อ่างเก็บน้ำ การชลประทาน และลักษณะการใช้ที่ดิน เป็นต้น จากความเชื่อมโยงทางชลศาสตร์ระหว่างน้ำบาดาล น้ำผิวดิน และน้ำฝน ทำให้ค่า $\delta^{18}\text{O}$ และ δD มีความเชื่อมโยง และสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้ทั้งด้านเชิงเวลา และพื้นที่ องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำบาดาล ($\delta^{18}\text{O}$ และ δD) ในการศึกษาครั้งนี้ ได้หมายรวมถึง บริเวณน้ำผุด (Spring Water) และบ่อน้ำบาดาล โดยทำการเก็บตัวอย่างในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย 34 ตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรในห้องปฏิบัติการ Isotopes Hydrology ณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอบางกรวย จังหวัดนครนายก โดยแบ่งบ่อน้ำบาดาลออกเป็น 2 ประเภท คือ บ่อน้ำบาดาลน้ำตื้น (ความลึกน้อยกว่า 50 เมตร) และบ่อน้ำบาดาลน้ำลึก (ความลึกมากกว่า 50 เมตร) จากการทดสอบตัวอย่างน้ำบาดาล พบลักษณะองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำบาดาล มีค่า δD อยู่ในช่วง -19.6 ‰ ถึง -70.1 ‰ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ -46.68 ‰ ค่า $\delta^{18}\text{O}$ อยู่ในช่วง -1.21 ‰ ถึง -9.93 ‰ และมีค่าเฉลี่ยที่ -6.14 ‰ ดังรูปที่ 4-17



รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียรน้ำบาดาล และ LMWL พื้นที่สุโขทัย

จากการพิจารณาองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำบาดาล พบว่าค่าส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าเส้น LMWL และมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเท่ากับ $\delta D = 4.02\delta^{18}O - 20.72$ พบว่ามีความชันและค่าดิวทีเรียมส่วนเกิน (Deuterium Excess) น้อยกว่าเส้น LMWL และ GMWL ซึ่งมีแนวโน้มในลักษณะเกิดกระบวนการระเหย จึงสรุปได้ว่า น้ำบาดาลในพื้นที่ มีอัตราการซึม (Recharge) ต่ำ อัตราการระเหยค่อนข้างสูง เพราะในพื้นที่ศึกษามีอุณหภูมิสูง

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำบาดาล เทียบกับน้ำฝน พบว่า ค่า δD และ $\delta^{18}O$ ของน้ำบาดาล มีค่าต่ำกว่าน้ำฝน เมื่อเทียบช่วงเวลาเดียวกันในช่วงฤดูแล้ง จึงบ่งบอกได้ว่าน้ำบาดาลในช่วงฤดูแล้ง มีแหล่งกำเนิดจากน้ำฝนนอกพื้นที่ หรือจากฝนที่ตกในพื้นที่ในช่วงฤดูฝนที่ผ่านมา อนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำบาดาล เทียบกับแม่น้ำยม ณ สถานีสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย ดังรูปที่ 4-17 พบว่า ค่า δD และ $\delta^{18}O$ อยู่ในช่วงเดียวกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่าในบริเวณดังกล่าว มีการเชื่อมโยงทางชลศาสตร์ของแหล่งน้ำทั้ง 2 แหล่ง ระหว่างน้ำผิวดิน และน้ำบาดาล ดังนั้น แม่น้ำยม ณ สถานีสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย มีการน้ำบาดาลไหลออกสู่แม่น้ำ ในรูปแบบอัตราการไหลพื้นฐาน (Base Flow)

4.6 การวิเคราะห์สมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทป (Isotopes Mass Balance Analysis)

ในการศึกษาองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล ในครั้งนี้ เพื่อวิเคราะห์แหล่งกำเนิดของน้ำบาดาล โดยใช้องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำบาดาล ประเมินสัดส่วนการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลจากแหล่งน้ำต่างๆ ในรูปของร้อยละโดยปริมาตร ดังสมการที่ 4.1

$$\delta^{18}O_{GW} = \delta^{18}O_{SW} (X) + \delta^{18}O_{RF} (1-X) \quad (4.1)$$

เมื่อ δ คือ องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของแหล่งต่างๆ

(X) คือ การเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลของน้ำผิวดิน

(1-X) คือ การเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลของน้ำฝน

ในการศึกษาครั้งนี้วิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรจากห้องปฏิบัติการ ได้ผลดังตาราง 4.4

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2559

แหล่งน้ำ	$\delta^{18}\text{O}$ (average)
น้ำฝน	-6.46 ‰
น้ำผิวดิน	-2.51 ‰
น้ำบาดาล	-5.44 ‰

เมื่อแทนค่าในสมการสมดุลมวลอุกวิทยาไอโซโทปเสถียร ดังสมการที่ 4.1 ด้วยค่าจากตาราง 4.3 สรุปว่า น้ำบาดาล มีแหล่งกำเนิดจากน้ำฝนร้อยละ 48.8 และน้ำผิวดินร้อยละ 51.2 และ การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยแบ่งเป็น 2 ฤดูกาล คือ ฤดูฝน และฤดูแล้งโดยใช้สมการ $d_{\text{GW}} = Xd_{\text{RW(wet)}} + (1-X)d_{\text{RW(dry)}}$ โดยใช้ค่าดิวทีเรียม ส่วนเกิน (Deuterium Excess) จากแหล่งต่างๆ แทนค่าในสมการ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

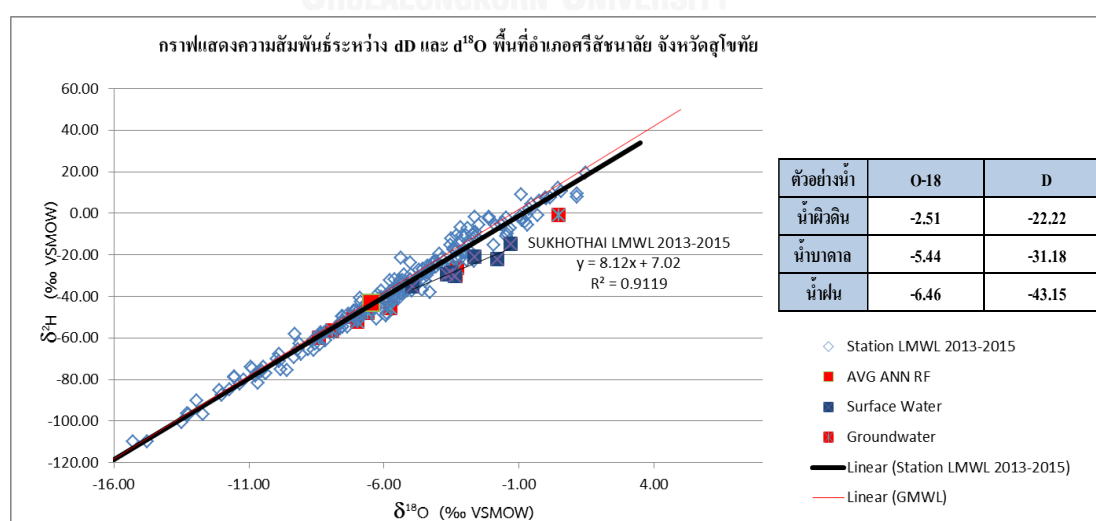
$$d_{\text{GW}} = Xd_{\text{RW(wet)}} + (1-X)d_{\text{RW(dry)}}$$

$$11.82 = 12.22X + 10.81(1-X)$$

$$\text{จะได้ } X = 0.714$$

$$1-X = 0.286$$

สรุปได้ว่าปริมาณน้ำบาดาล มีปริมาณการเติมในช่วงฤดูฝนร้อยละ 71.4 และช่วงฤดูแล้งร้อยละ 28.6



รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียร ณ อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2559

จากปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบไอโซโทปเสถียร ณ พื้นที่อำเภอศรีษะนาลัย จังหวัดสุโขทัย ดังรูปที่ 4-18 เมื่อแทนค่าในสมการสมดุลมวลอุกวิทยาไอโซโทปเสถียร ซึ่งมีวิธีการคำนวณ ดังนี้

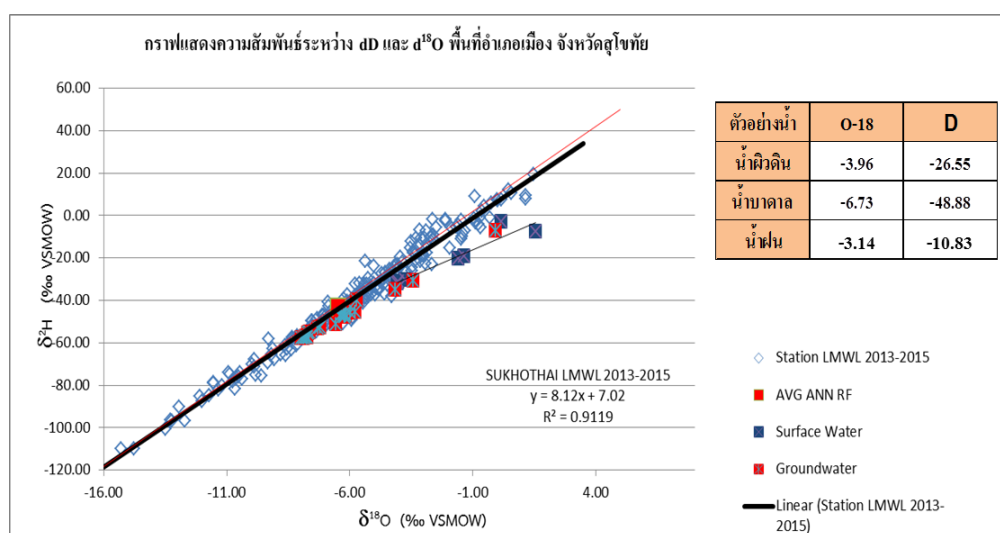
$$\delta^{18}\text{O}_{\text{GW}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}} (X) + \delta^{18}\text{O}_{\text{RF}} (1-X)$$

$$-5.44 = -2.51X + (-6.46)(1-X)$$

$$\text{จะได้ } X = 0.258$$

$$1-X = 0.742$$

จากการคำนวณข้างต้น แสดงให้เห็นว่า น้ำบาดาล มีแหล่งกำเนิดจากน้ำฝนร้อยละ 74.2 และน้ำผิวดินร้อยละ 25.8



รูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียร ณ อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2559

จากปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบไอโซโทปเสถียร ณ พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ดังรูปที่ 4-19 เมื่อแทนค่าในสมการสมดุลมวลอุกวิทยาไอโซโทปเสถียร พบว่า น้ำบาดาล ไม่ได้มีความเชื่อมโยงกับน้ำฝนที่ตกในช่วงเวลาเดียวและน้ำผิวดินในพื้นที่ แต่พบว่า น้ำบาดาลในฤดูแล้ง พื้นที่อำเภอเมืองสุโขทัย มีค่าไอโซโทปใกล้เคียงกับไอโซโทปเสถียรในฤดูฝนก่อนหน้า ดังตาราง 4-5 หากพิจารณาหาปริมาณน้ำบาดาลระดับต้นที่ไหลออกสู่แม่น้ำยม ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้ โดยวิธีการคำนวณ ดังนี้

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{GW}} (X) + \delta^{18}\text{O}_{\text{RF}} (1-X)$$

$$-3.96 = -6.73X + (-3.14)(1-X)$$

$$\text{จะได้ } X = 0.281$$

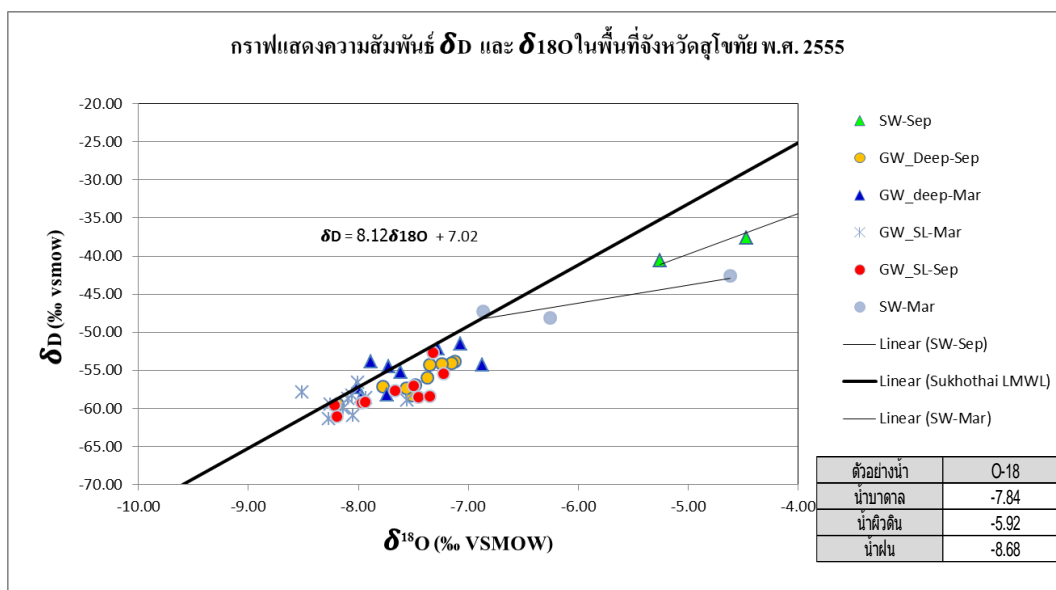
$$1-X = 0.729$$

จากการคำนวณข้างต้น แสดงให้เห็นว่า แม่น้ำยม มีแหล่งกำเนิดจากน้ำฝนร้อยละ 72.9 และ น้ำบาดาลร้อยละ 28.1

ตารางที่ 4-5 ค่าองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรน้ำฝน น้ำท่า น้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2559 จังหวัดสุโขทัย

ชนิดตัวอย่าง	D,O-18	Wet Season		Dry Season	
		ช่วง	เฉลี่ย	ช่วง	เฉลี่ย
Rainfall Data	O-18	-4.14 to -9.34	<u>-6.46</u>	1.15 to -5.86	-2.54
	D	-22.27 to -66.31	<u>-43.15</u>	7.99 to -39.03	-10.83
Surface Water	O-18	-	-	1.54 to -4.93	-2.45
	D	-	-	-2.95 to -35.39	-23.27
Groundwater	O-18	-	-	0.49 to -8.40	<u>-6.04</u>
	D	-	-	-1.16 to -60.05	<u>-45.57</u>

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลไอโซโทปเสถียรในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ในปี พ.ศ. 2555 จากการทรัพยากรน้ำบาดาล เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัดส่วนไอโซโทปเสถียรจากน้ำแหล่งต่างๆ อาทิ น้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล ดังรูปที่ 4-10 พบว่า ไอโซโทปเสถียรของน้ำบาดาลในพื้นที่สุโขทัย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำบาดาลในชั้นดิน และน้ำบาดาลในชั้นน้ำบาดาลระดับลึก พบว่าน้ำบาดาลระดับลึก มีค่าสัดส่วนไอโซโทปเสถียรต่ำกว่าน้ำบาดาลระดับดิน อันเป็นผลมาจากน้ำบาดาลระดับลึกมีแหล่งกำเนิดจากพื้นที่ต้นน้ำ ซึ่งมาจากกระยะไกล จากชายฝั่งทะเล หรืออาจไหลซึมมาจากต้นกำเนิดที่มีระดับภูมิประเทศสูง ทำให้สัดส่วนไอโซโทปเสถียรมีค่าต่ำ อนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างน้ำในช่วงเดือนกันยายน และเดือนมีนาคม ดังรูปที่ 4-19 พบว่า สัดส่วนไอโซโทปเสถียรของน้ำที่ทำการเก็บข้อมูลในช่วงเดือนกันยายน มีค่าต่ำกว่า ซึ่งมีอิทธิพลมาจากฤดูกาล หรือปริมาณฝนที่ตกในช่วงนั้นๆ หากในช่วงดังกล่าวมีฝนตก จะทำให้สัดส่วนไอโซโทปเสถียรมีค่าต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของน้ำบาดาลและน้ำจากแหล่งอื่นๆ พบว่าส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าเส้น Local Meteoric Water Line (LMWL) ซึ่งเป็นอิทธิพลจากการระเหย



รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียร จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2555

รูปที่ 4-20 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรที่เก็บตัวอย่างน้ำ โดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ในปี พ.ศ. 2555 เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีสมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทปเสถียร (Stable Isotope Mass Balance) ของดิวทีเรียมและออกซิเจน-18 พบว่า

$$\delta^{18}O_{GW} = \delta^{18}O_{SW} (X) + \delta^{18}O_{RF} (1-X)$$

$$-7.84 = -5.92X + (-8.68)(1-X)$$

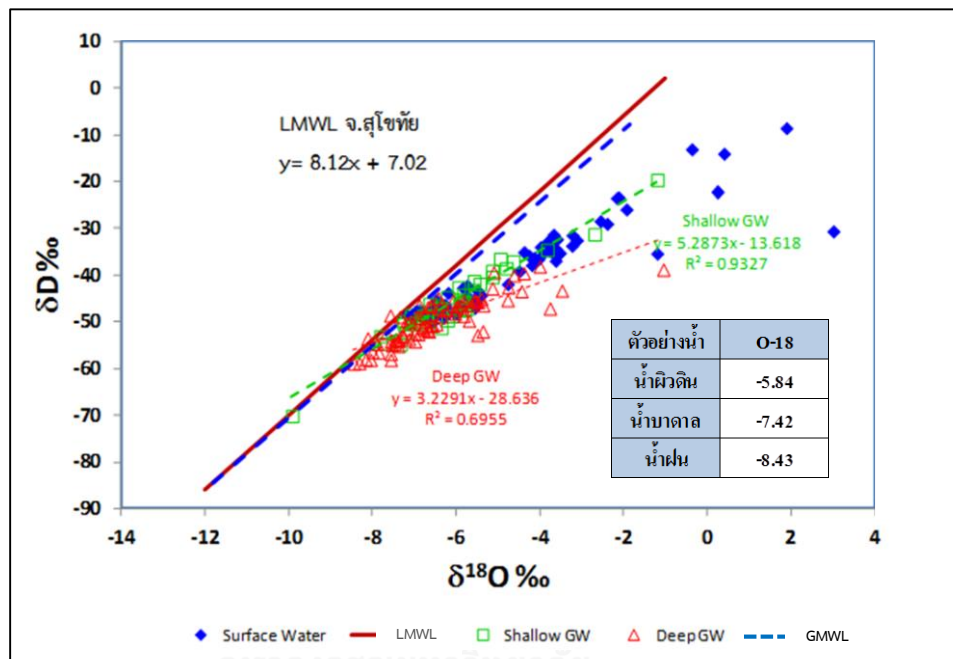
$$\text{จะได้ } X = 0.282$$

$$1-X = 0.728$$

จากการคำนวณข้างต้น พบว่า น้ำบาดาลมีแหล่งกำเนิดมาจาก น้ำผิวดินร้อยละ 28.2 และ น้ำฝนร้อยละ 72.8

หากเปรียบเทียบกับข้อมูลในอดีต ในการศึกษาครั้งนี้ ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลไอโซโทปเสถียร ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ในปี พ.ศ. 2551 โดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัดส่วนไอโซโทปเสถียรจากน้ำแหล่งต่างๆ อาทิ น้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล ดังรูปที่ 4-21 พบว่า ไอโซโทปเสถียรของน้ำบาดาลในพื้นที่สุโขทัย เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างน้ำบาดาลในชั้นตื้น และน้ำบาดาลในชั้นน้ำบาดาลระดับลึก พบว่าน้ำบาดาลระดับลึก มีค่าสัดส่วนไอโซโทปเสถียรต่ำกว่าน้ำบาดาลระดับตื้น อันเป็นผลมาจากน้ำบาดาลระดับลึก มีแหล่งกำเนิดจากพื้นที่ต้นน้ำ ซึ่งมาจากกระยะไกลจากชายฝั่งทะเล หรืออาจไหลซึมมาจากต้นกำเนิดที่

มีระดับภูมิประเทศสูง ทำให้สัดส่วนไอโซโทปเสถียรมีค่า เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของน้ำจากแหล่งต่างๆ ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย พบว่าส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าเส้น Local Meteoric Water Line (LMWL) เนื่องจากอิทธิพลการระเหยซึ่งเป็นปกติของแหล่งน้ำผิวดิน หากแต่สัดส่วนไอโซโทปเสถียรของน้ำบาดาล โดยเฉพาะในระดับตื้น มีแนวโน้มเกิดการระเหยคล้ายคลึงกับน้ำผิวดิน อาจเกิดการระเหยของน้ำบาดาลระดับตื้นในชั้นรากพืช (Root Zone) อีกนัยหนึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ลักษณะความคล้ายคลึงดังกล่าวนี้ อาจกล่าวได้ว่า น้ำบาดาลระดับตื้นมีความเชื่อมโยงกับน้ำผิวดิน ซึ่งอาจมีการเติมของน้ำผิวดินลงสู่ชั้นบาดาล



รูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ไอโซโทปเสถียร จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2551

จากข้อมูลองค์ประกอบไอโซโทปเสถียร ที่เก็บตัวอย่างน้ำในปี พ.ศ. 2551 เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีสมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทป (Stable Isotope Mass Balance) ของดิวทีเรียมและออกซิเจน-18 โดยมีวิธีการคำนวณ ดังนี้

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{GW}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}} (X) + \delta^{18}\text{O}_{\text{RF}} (1-X)$$

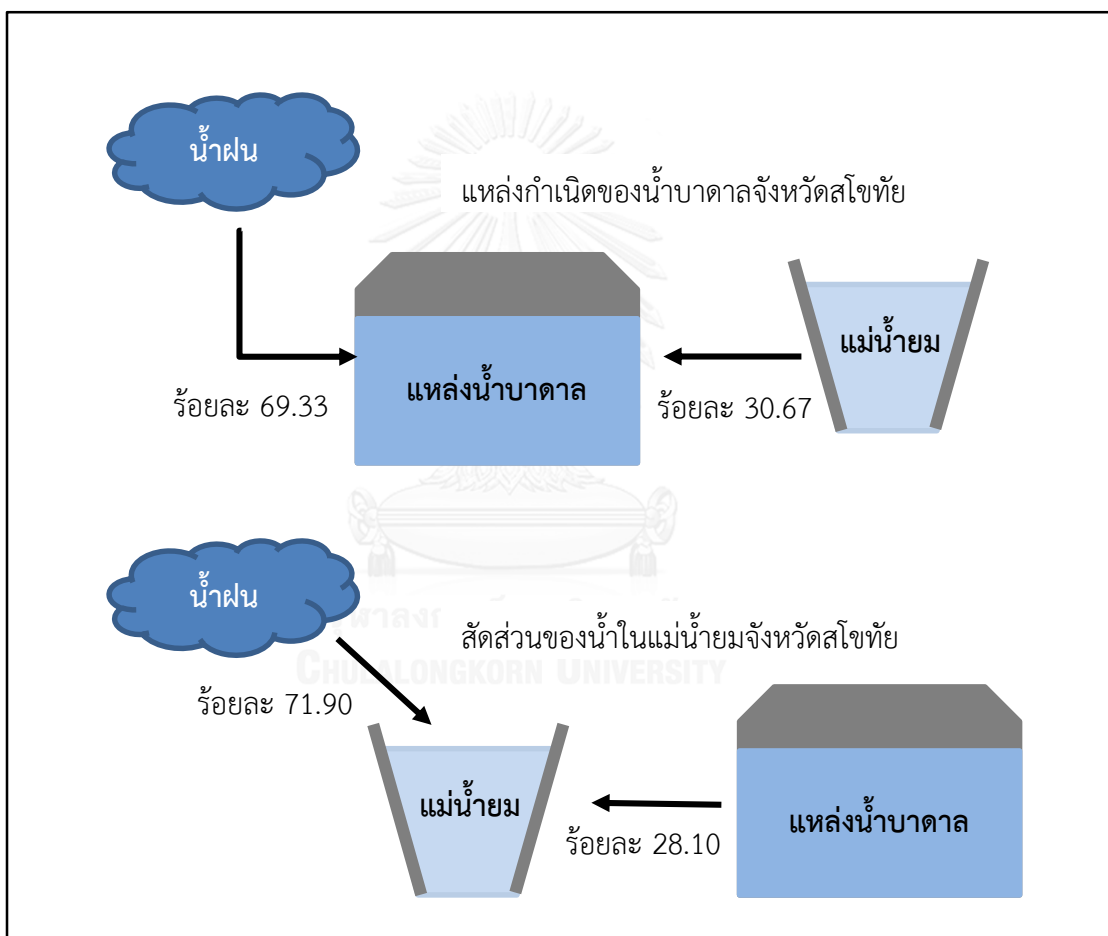
$$-7.42 = -5.84X + (-8.43)(1-X)$$

$$\text{จะได้ } X = 0.39$$

$$1-X = 0.61$$

จากการคำนวณข้างต้น พบว่า ในปี พ.ศ. 2551 น้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัยมีแหล่งกำเนิดมาจาก น้ำผิวดินร้อยละ 39 และน้ำฝนร้อยละ 61

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ในปี พ.ศ. 2551 2555 และ 2559 จากองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรพบว่า น้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย มีแหล่งกำเนิดมาจากน้ำผิวดินเฉลี่ยร้อยละ 30.67 และมาจากน้ำฝนเฉลี่ยร้อยละ 69.33 อีกทั้งยังพบว่า แม่น้ำยม มีสัดส่วนการไหลจากน้ำฝนร้อยละ 71.9 และจากน้ำบาดาลร้อยละ 28.1 ดังรูปที่ 4-22



รูปที่ 4-22 สรุปผลการศึกษาคู่ประกอบไอโซโทปเสถียร

บทที่ 5

การสร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างน้ำผิวดินและปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่ลุ่มน้ำยมด้วยแบบจำลองทางอุทกวิทยา (น้ำฝน - น้ำท่า) โดยใช้แบบจำลอง ArcSWAT ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายข้อมูล (Semi-Distributed Model) ดังนั้นในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงแหล่งข้อมูลที่นำมาใช้ในการจำลอง การเปรียบเทียบแบบจำลอง และการประยุกต์ใช้ผลการศึกษาเพื่อศึกษาปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Groundwater Recharge) และปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ในพื้นที่ลุ่มน้ำยม

5.1 ข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง

ข้อมูลที่ใช้เพื่อนำเข้าสู่แบบจำลองในการศึกษาครั้งนี้ ได้รวบรวมจากหน่วยงานต่างๆ เช่น กรมอุตุนิยมวิทยา กรมชลประทาน กรมพัฒนาที่ดิน เป็นต้น (ดังตาราง 5-1) และได้มีการออกสำรวจภาคสนามเพื่อทำความเข้าใจลักษณะทางกายภาพของพื้นที่จริง เช่น ลักษณะทางกายภาพของแม่น้ำสายหลัก สภาพและที่ตั้งของสถานีตรวจวัดข้อมูลภาคสนามทางอุทกวิทยา และลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ เป็นต้น มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5-1 ข้อมูลและที่มาของข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง ArcSWAT

ลำดับ	รายการข้อมูล	ที่มา	ปี	ลักษณะของข้อมูล
1. ข้อมูลภูมิประเทศ				
1.1	ระดับความสูงของพื้นที่	www.GMS.org	2549	ข้อมูลภูมิศาสตร์
1.2	ขอบเขตลุ่มน้ำ	กรมทรัพยากรน้ำ	2546	ข้อมูลภูมิศาสตร์
1.3	ขอบเขตการปกครอง	กรมทรัพยากรน้ำ	2546	ข้อมูลภูมิศาสตร์

ลำดับ	รายการข้อมูล	ที่มา	ปี	ลักษณะของข้อมูล
2. ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน				
2.1	การใช้ประโยชน์ที่ดิน	กรมพัฒนาที่ดิน	2549	ข้อมูลภูมิศาสตร์
3. ข้อมูลทางธรณีวิทยา				
3.1	ชุดดินและหิน	กรมพัฒนาที่ดิน	2550	ข้อมูลภูมิศาสตร์
4. ข้อมูลทางอุทกวิทยาและอุตุนิยมวิทยา				
4.1	น้ำฝนรายวัน	กรมอุตุนิยมวิทยา	2522-2556	ข้อมูลรายวัน
4.2	น้ำท่ารายวัน	กรมชลประทาน	2522-2556	ข้อมูลรายวัน
4.3	อุณหภูมिरายวัน	กรมอุตุนิยมวิทยา	2522-2556	ข้อมูลรายวัน
4.4	ความชื้นสัมพัทธ์	กรมอุตุนิยมวิทยา	2522-2556	ข้อมูลรายวัน
4.5	ความเร็วลม	กรมอุตุนิยมวิทยา	2522-2556	ข้อมูลรายวัน

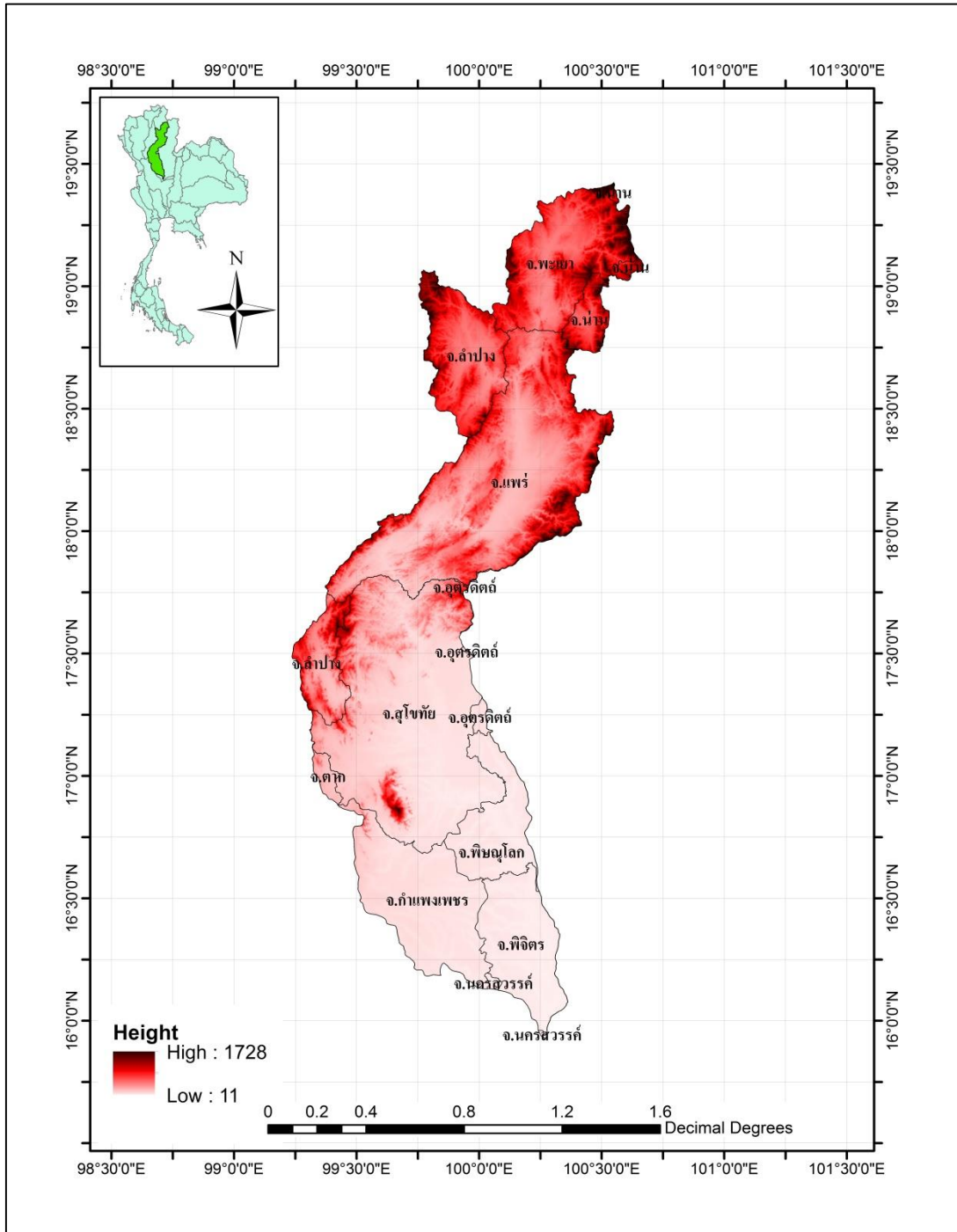
5.1.1 ข้อมูลด้านภูมิประเทศ

ข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพทั่วไปของพื้นที่ศึกษา ที่มีการเก็บรวมเพื่อนำเข้าแบบจำลอง ได้แก่ ขอบเขตลุ่มน้ำ ลักษณะโครงข่ายลำน้ำ ขอบเขตการปกคลุม และข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่ (Digital Elevation Map ; DEM) โดยมีรายละเอียดและที่มาของข้อมูล ดังต่อไปนี้

- ข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่ (Digital Elevation Map ; DEM) มีที่มาจากข้อมูลของกรมแผนที่ทหาร ขนาดความละเอียดข้อมูล 90 เมตร ซึ่งจัดทำปี พ.ศ. 2549

- ข้อมูลของเขตพื้นที่ลุ่มน้ำ และลักษณะโครงข่ายลำน้ำ มีที่มาจากมติคณะกรรมการทรัพยากรน้ำแห่งชาติ จากรายงาน “มาตรฐานลุ่มน้ำและลุ่มน้ำสาขา” (พ.ศ. 2546)

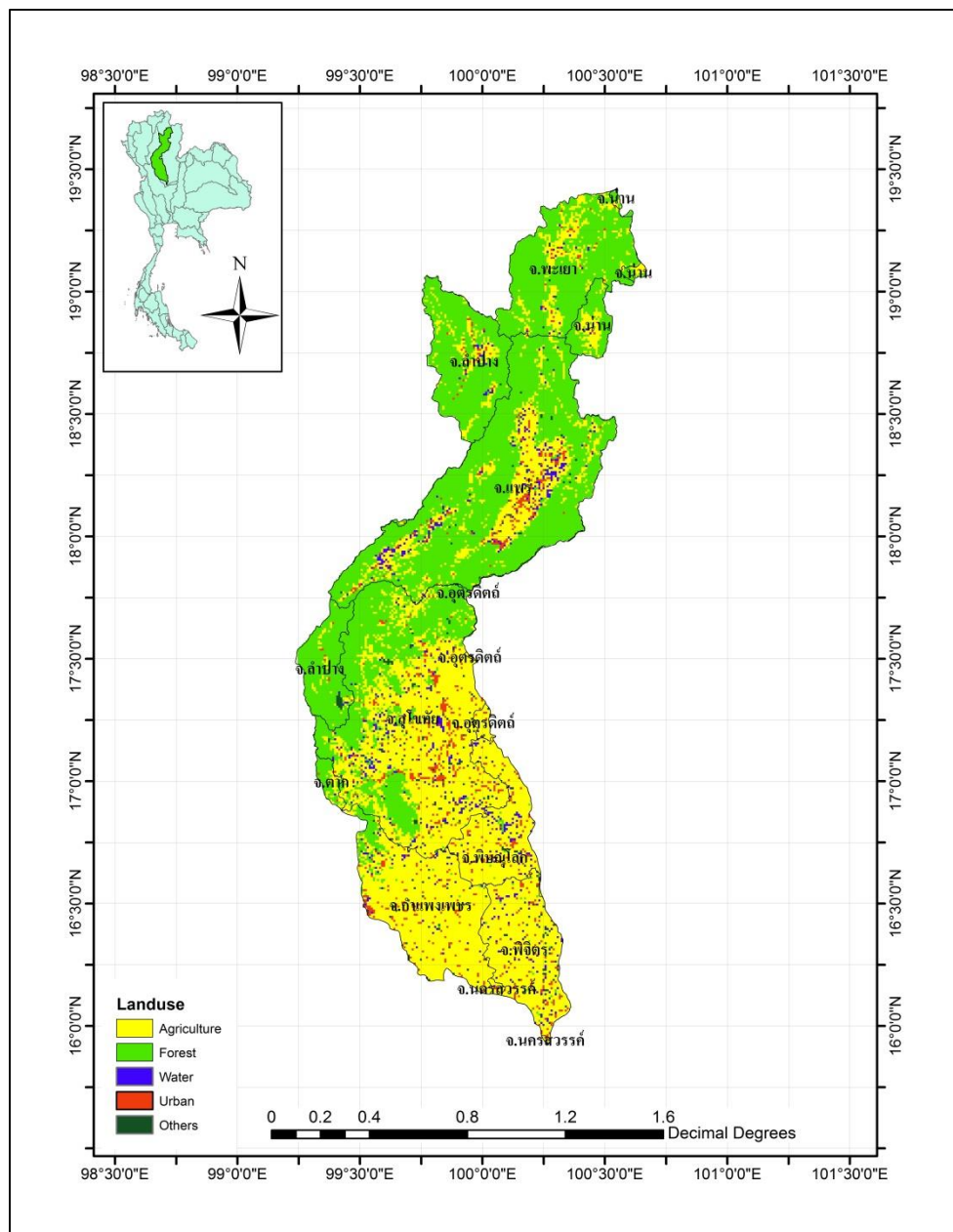
- ข้อมูลขอบเขตการปกครอง จากกระทรวงมหาดไทย (พ.ศ. 2546)



รูปที่ 5-1 แผนที่ระดับชั้นความสูงของพื้นที่

5.1.2 ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน

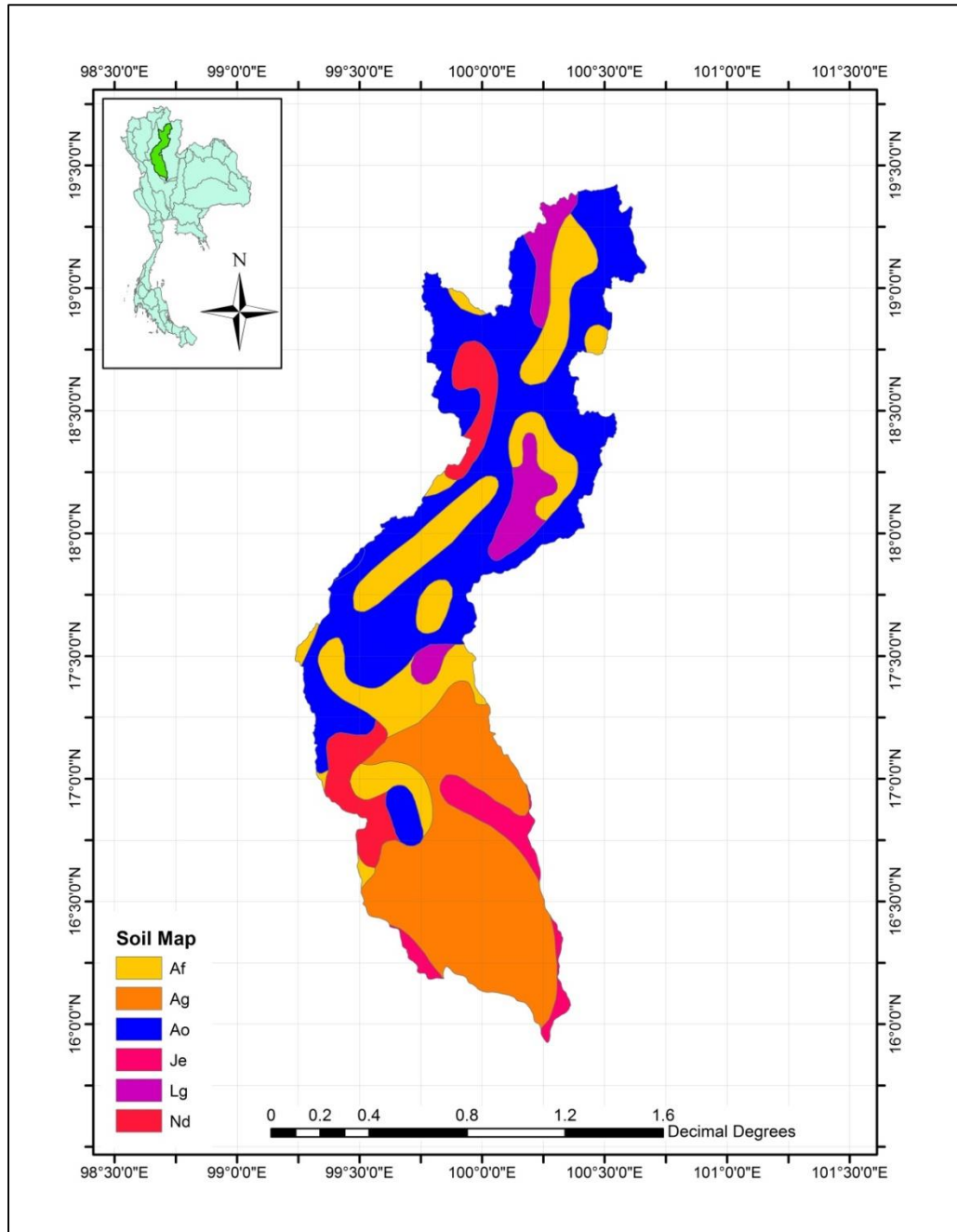
ในการศึกษาครั้งนี้ ได้รวบรวมข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินจากกรมพัฒนาที่ดิน ซึ่งเป็นหนึ่งในข้อมูลสำคัญสำหรับการนำเข้าแบบจำลอง เนื่องจากการใช้ประโยชน์ที่ดินส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการเกิดน้ำท่า ดังนั้นความถูกต้องของข้อมูล จึงส่งผลอย่างมากในขั้นตอนการปรับเทียบแบบจำลอง โดยทำการแบ่งการใช้พื้นที่ออกเป็น 5 ชนิดดังรูปที่ 5-2 ได้แก่ พื้นที่ป่า พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่อยู่อาศัย พื้นน้ำ และพื้นที่อื่นๆ อันได้แก่ โดยมีสัดส่วนจากพื้นที่ทั้งหมด 45% 47% 3% 1% และ 4% ตามลำดับ



รูปที่ 5-2 แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน

5.1.3 ข้อมูลทางธรณีวิทยา

ในการศึกษานี้ ได้รวบรวมข้อมูลดิน จากกรมพัฒนาที่ดิน โดยแปลงระบบทางภูมิศาสตร์ให้อยู่ในระบบกริด (Grid) เพื่อนำเข้าแบบจำลอง สำหรับข้อมูลดินทั่วไปแล้ว ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพเท่าใดนัก

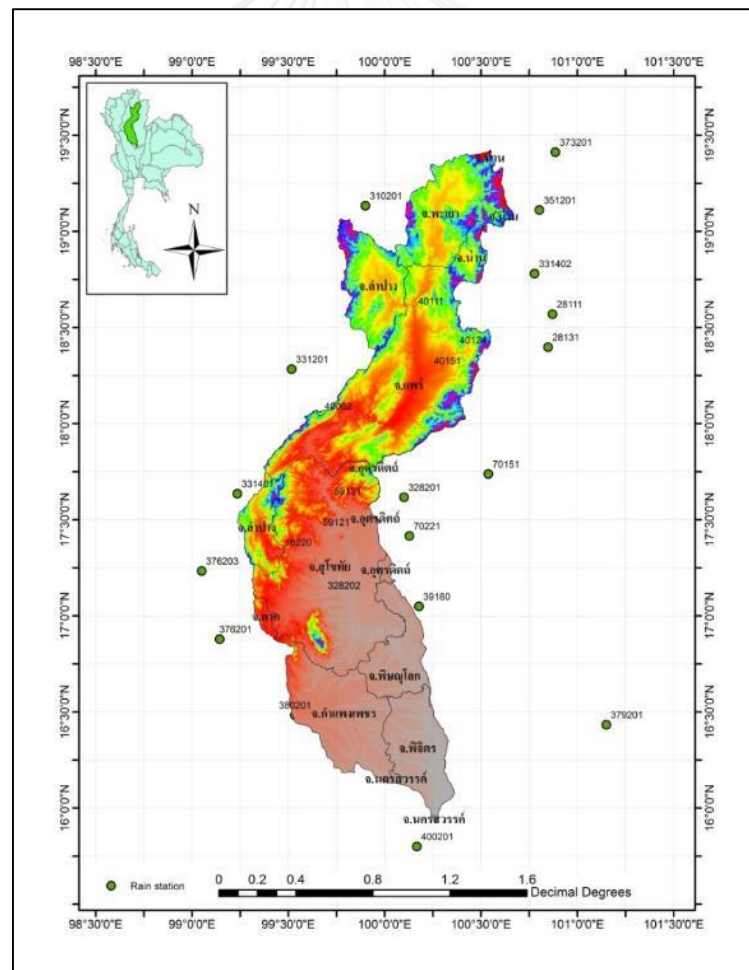


รูปที่ 5-3 แผนที่ชุดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำยม

5.1.4 ข้อมูลอุทกวิทยาและอุตุนิยมวิทยา

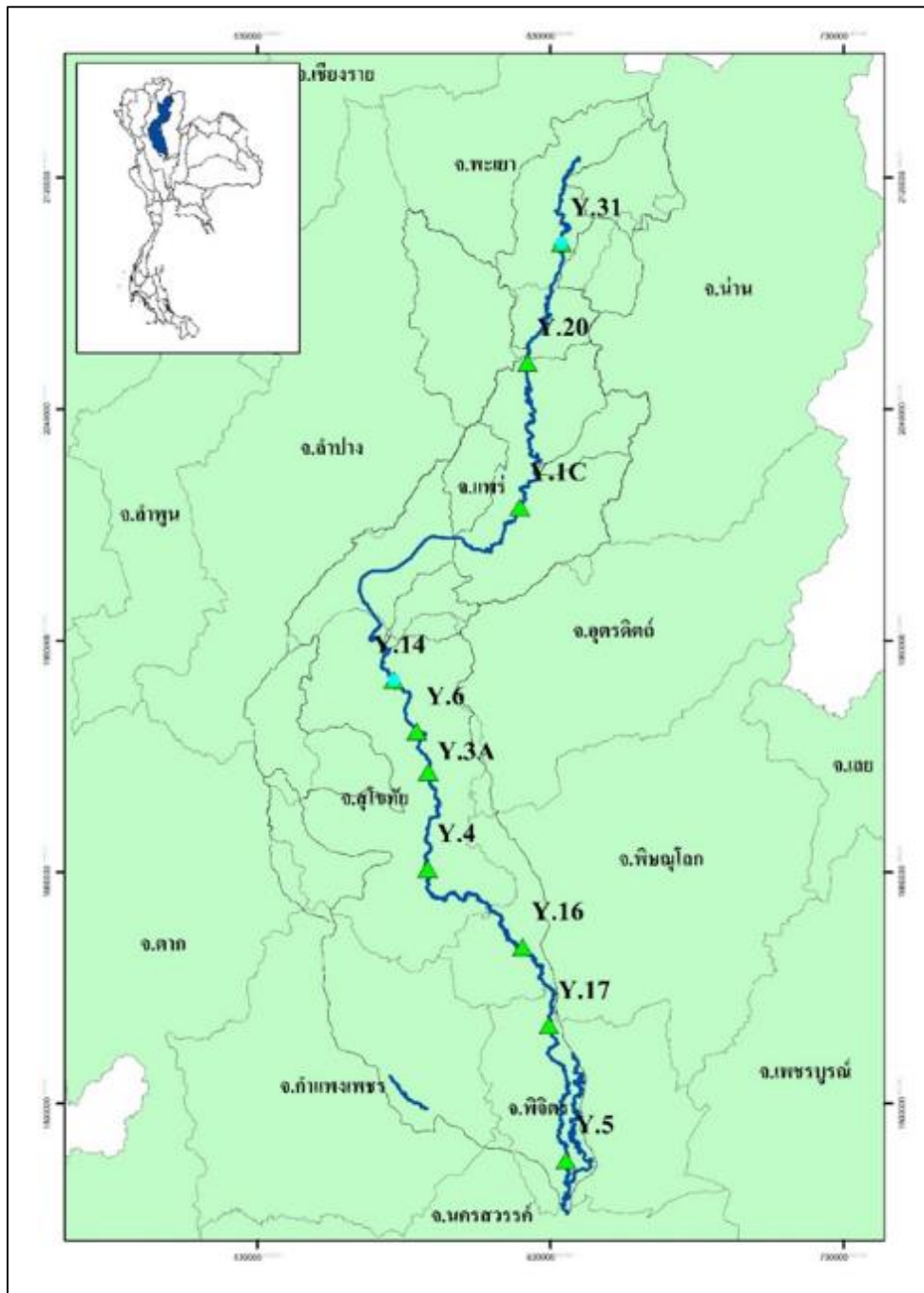
ข้อมูลด้านอุทกวิทยาและอุตุนิยมวิทยาสำหรับใช้ในการศึกษาครั้งนี้ รวบรวมจากกรมชลประทาน และกรมอุตุนิยมวิทยา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2556 ประกอบด้วย ปริมาณฝน อุณหภูมิ ความเร็วลม ปริมาณ ความชื้นสัมพัทธ์ และข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ โดยนำเข้าสู่ข้อมูลรายจังหวัด ที่ตั้งอยู่ในขอบเขตของกลุ่มน้ำยม

ข้อมูลฝน จัดเป็นข้อมูลหลักและข้อมูลพื้นฐานทางอุทกวิทยาที่นำเข้าสู่แบบจำลอง เพื่อจำลอง ปริมาณน้ำท่า โดยทำการจำลองฝนเชิงพื้นที่โดยใช้วิธี Thiessen Polygon ซึ่งสามารถจำลองได้จาก ปริมาณฝนสังเกตการณ์จากสถานีตรวจวัดน้ำฝนของกรมชลประทานและกรมอุตุนิยมวิทยา ที่ตั้งอยู่ใน ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ใกล้เคียง ข้อมูลฝนที่รวบรวมได้เป็นข้อมูลที่มีการตรวจวัดรายวันในแต่ ละสถานี จำนวนทั้งสิ้น 24 สถานี ดังรูปที่ 5-4 อนึ่ง แบบจำลองจะมีความแม่นยำมากน้อยเพียงไรนั้น ขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลเป็นหลัก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงทำการวิเคราะห์ความสอดคล้องของ ฝน ณ สถานีต่างๆกับสถานีใกล้เคียงก่อนเข้าสู่แบบจำลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในภาคผนวก ง



รูปที่ 5-4 สถานีฝนรายวัน

สำหรับข้อมูลน้ำท่า ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลน้ำท่าสังเกตการณ์จากสถานีตรวจวัดน้ำท่าของกรมชลประทานจำนวน 2 สถานี เพื่อใช้เปรียบเทียบแบบจำลอง ประกอบด้วย สถานี Y.31 อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา และสถานี Y.14 อำเภอศรีสาชนาลัย จังหวัดสุโขทัย โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2543 ถึง 2556 ดังแสดงในรูปที่ 5-5



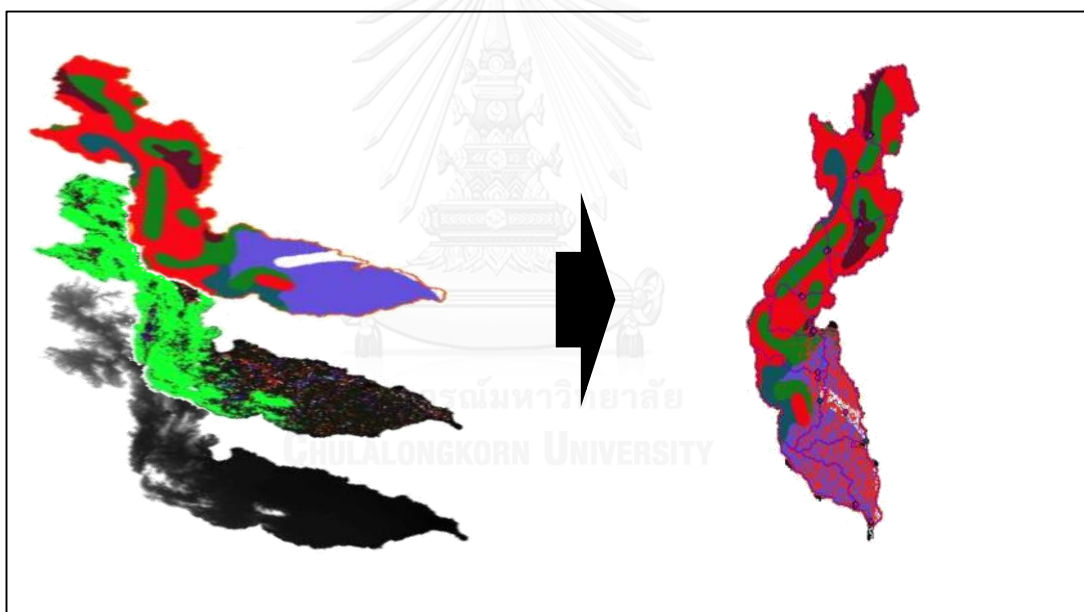
รูปที่ 5-5 สถานีตรวจวัดน้ำท่า

5.2 การนำเข้าข้อมูลในแบบจำลองน้ำฝน – น้ำท่า (ArcSWAT)

การนำเข้าข้อมูลในแบบจำลอง ArcSWAT ประกอบด้วย ข้อมูลชั้นความสูง ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลชุดดินและหิน และข้อมูลสภาพอากาศ หากข้อมูลดังกล่าวมีความสมบูรณ์ ถูกต้องจะทำให้ผลการจำลองมีความแม่นยำ ดังนั้นขั้นตอนการนำเข้าข้อมูลจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ข้อมูลชั้นความสูง (DEM) การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use) และข้อมูลชุดดินและหิน (Soil Type) จะถูกจัดกลุ่มตามลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ ให้อยู่ในรูปแบบของหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Units) เพื่อคำนวณในรูปแบบกริดเซลล์ อีกทั้งยังสามารถคำนวณในรูปแบบลุ่มน้ำย่อยได้

การศึกษาครั้งนี้กำหนดให้ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินมากกว่าร้อยละ 30 ของพื้นที่ทั้งหมด ข้อมูลชุดดินและหินร้อยละ 30 ของพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน และข้อมูลความชันของพื้นที่ร้อยละ 10 ของพื้นที่ทั้งหมด จัดเป็น 1 หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา ดังรูปที่ 5-6



รูปที่ 5-6 การนำเข้าข้อมูลแบบจำลอง ArcSWAT

เมื่อจัดกลุ่มหน่วยการตอบสนองแล้วเสร็จ หลังจากนั้นจะเป็นขั้นตอนการนำเข้าข้อมูลสภาพภูมิอากาศ แบบจำลองจะแปลงข้อมูลเชิงพื้นที่เป็นเชิงตัวเลข เพื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เข้าสู่การคำนวณ

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ArcSWAT สามารถคำนวณได้หลายรูปแบบเชิงเวลา ได้แก่ รายวัน รายเดือน และรายปี ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะจำลองผลในรูปแบบรายเดือน เพื่อเตรียมเป็นข้อมูลนำเข้าสู่แบบจำลองน้ำบาดาล GMS-MODFLOW ต่อไป

5.3 การเปรียบเทียบแบบจำลองน้ำฝน – น้ำท่า (ArcSWAT)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางอุทกวิทยาน้ำฝน – น้ำท่า โดยใช้ปริมาณน้ำท่าที่ตรวจวัดได้จริงจากสถานีตรวจวัดสนาม ณ สถานี Y.31 อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา และสถานี Y.14 อำเภอศรีสัชชนาลัย จังหวัดสุโขทัย เป็นตัวแทนน้ำท่าในกลุ่มน้ำยมเพื่อใช้เปรียบเทียบแบบจำลอง โดยวิเคราะห์ผลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 ถึง 2556 ผลที่ได้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝน และปริมาณน้ำท่า เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลจากแบบจำลอง SWAT มีความถูกต้องน่าเชื่อถือเพียงใดนั้น ต้องมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดได้จริงจากสถานีตรวจวัดสนาม โดยในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลการจำลองจากแบบจำลองที่เปรียบเทียบแล้วว่ามีควมน่าเชื่อถือเพียงใด

5.3.1 การเปรียบเทียบแบบจำลองน้ำฝน – น้ำท่า แบบอัตโนมัติ (SWAT-CUP)

แบบจำลองทางอุทกวิทยาน้ำฝน – น้ำท่า (SWAT) ถูกพัฒนาขึ้นมาพร้อมกับ แบบจำลองเปรียบเทียบอัตโนมัติ (SWAT-CUP) ซึ่งทำการปรับแก้แบบจำลองโดยใช้วิธีสุ่มตัวแปร (Trial & Error) หรือวิธีการหาค่าที่เหมาะสมทางคณิตศาสตร์ (Numerical Optimization) โดยการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้เป้าหมายทางสถิติ (Objective Function) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิผล (R^2) และค่าความแม่นยำของแบบจำลอง (Nash - Sutcliffe Coefficient, NSE) ซึ่งกำหนดจำนวนตัวแปรสุ่ม 5 กลุ่มตัวแปรหลัก โดยมี 10 ตัวแปรย่อย ซึ่งคัดเลือกจากผลการศึกษาความอ่อนไหวของแบบจำลองต่อพารามิเตอร์ ดังนี้

1. พารามิเตอร์เกี่ยวกับการจัดการที่ดิน (.MGT File) การประเมินผลกระทบของกิจกรรมของมนุษย์ และเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงสถานะของการเจริญเติบโตของพืช ในแต่ละหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา ได้แก่
 - ค่า Curve Number (CN_2) เป็นฟังก์ชันของการซึมได้ของน้ำในดิน และสภาพการใช้ที่ดิน (ดังที่อธิบายในบทที่ 2) และเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการคำนวณการเกิดน้ำท่าโดยวิธี SCS Curve Number สำหรับ moisture condition Type II
2. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการระเหย (.BRN File)
 - แฟกเตอร์ชดเชยการระเหยในดิน (Soil Evaporation Compensation Factor ;ESCO)
3. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับน้ำใต้ดิน (.GW File)
 - ค่าความลึกต่ำสุดของน้ำในแหล่งน้ำตื้นที่ต้องการสำหรับไหลกลับสู่ลำน้ำ (GWQMN)
 - ค่าสัมประสิทธิ์การระเหยของน้ำใต้ดิน (GW_REVAP)

- แฟกเตอร์การไหลลดลงของปริมาณการไหลพื้นฐาน (ALPHA_BF)
 - แฟกเตอร์ความหน่วงของการไหลพื้นฐาน (GW_DELAY)
 - ค่าความสามารถในการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลชั้นลึก (RCHRG_DP)
4. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับลำน้ำ (.RTE)
- สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของลำน้ำ (CH_N2) ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของลำน้ำ Manning's N
5. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับดิน (.SOL File)
- ปริมาณน้ำที่ดินสามารถเก็บกักไว้ได้ (SOL_AWC)
 - ความสามารถในการซึมของน้ำในดิน (SOL_K)

ตารางที่ 5-2 ผลการศึกษาความอ่อนไหวของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ArcSWAT

Parameter Name	P-Value	t-stat
1:R_CN2.mgt	0.00	-25.07
2:A_SOL_AWC(..).sol	0.00	11.37
3:V_GW_DELAY.gw	0.02	2.33
4:V_ALPHA_BF.gw	0.06	1.92
5:R_SOL_K(..).sol	0.07	1.84
6:V_GWQMN.gw	0.09	-1.71
7:V_RCHRG_DP.gw	0.21	1.26
8:V_ESCO.bsn	0.35	-0.94
9:R_CH_N2.rte	0.57	0.57
10:V_GW_REVAP.gw	1.00	-0.01

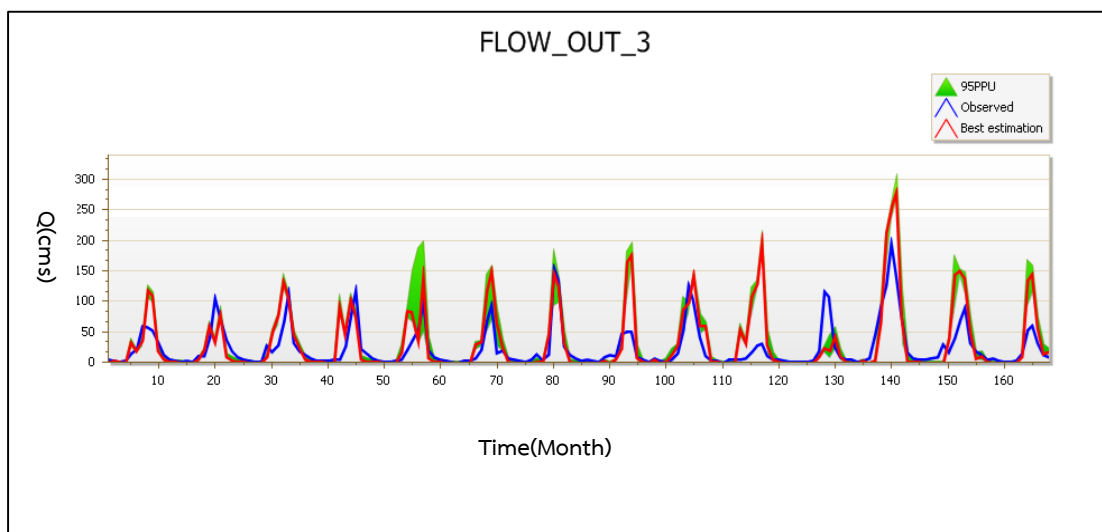
ตารางที่ 5-2 แสดงการทดสอบความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าในแบบจำลอง ArcSWAT โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้ค่า Probability Value เป็นดัชนีในการตัดสินใจ หากค่า P-Value ของพารามิเตอร์ตัวใดมีค่าน้อย แสดงว่ามีความอ่อนไหวมาก ซึ่งค่า Curve Number ส่งผลต่อการเกิดน้ำท่ามากที่สุด

ซึ่งการปรับเทียบแบบจำลอง ใช้วิธี Trial and Error โดยกำหนด Objective Function ให้ $R^2 = 1$ และ $NSE = 1$ รอบการประมวลผล 500 รอบ ด้วยแบบจำลองปรับเทียบอัตโนมัติ SWAT-CUP ได้ค่าตัวแปรดังนี้

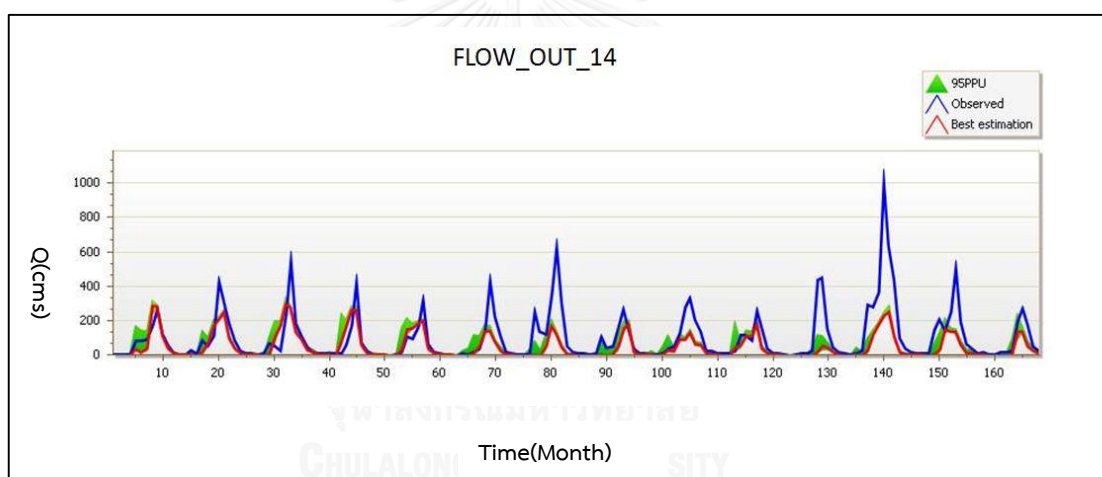
ตารางที่ 5-3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับแก้อัตโนมัติ

Parameter Name	Fitt-Value	Min-Value	Max-Value
1:R_CN2.mgt	58.281	35.124	90.352
2:V_ALPHA_BF.gw	0.523	0.196	0.741
3:V_GW_DELAY.gw	36.180	16.568	67.922
4:V_GWQMN.gw	504.231	189.087	714.327
5:V_ESCO.bsn	0.305	0.114	0.432
6:V_RCHRG_DP.gw	0.362	0.136	0.513
7:V_GW_REVAP.gw	0.146	0.055	0.207
8:A_SOL_AWC(..).sol	0.155	0.058	0.220
9:R_SOL_K(..).sol	0.587	0.220	0.832
10:R_CH_N2.rte	0.021	0.008	0.030

จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดสนาม ที่สถานี Y.31 อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา (FLOW_OUT_3) และสถานี Y.14 อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย (FLOW_OUT_14) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิผล (R^2) เท่ากับ 0.716 และค่าความแม่นยำของแบบจำลอง (NSE) เท่ากับ 0.673 ดังรูปที่ 5-7 และรูปที่ 5-8 ตามลำดับ



รูปที่ 5-7 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่า ณ สถานี Y.31 อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา



รูปที่ 5-8 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่า ณ สถานี Y.14 อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย

รูปที่ 5-7 และรูปที่ 5-8 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่ารายเดือนจากการสังเกตการณ์ ณ สถานี Y.31 อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา และสถานี Y.14 อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย กับ ปริมาณน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลองปรับเทียบอัตโนมัติ SWAT – CUP ในปี พ.ศ. 2543-2556 พบว่ามีความรูปแบบและแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง เพียงแต่ปริมาณการไหลสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองยังต่ำกว่าปริมาณน้ำท่าที่วัดได้จริงอยู่ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าระหว่าง 2 สถานี ปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง ณ สถานี Y.31 มีความสอดคล้องและคล้ายคลึงกับปริมาณน้ำท่าที่วัดได้จริง มากกว่าสถานี Y.14 หากเปรียบเทียบในแต่ละปีพบว่า ในปี พ.ศ.2543-2549 ผลการจำลองแม่นยำ

มากกว่า อันเนื่องมาจากในช่วงปีถัดมา การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำยมมีการเปลี่ยนแปลงไปจาก ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ได้นำเข้าแบบจำลอง จึงส่งผลให้ความแม่นยำลดน้อยลง

จากตารางที่ 5-2 จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวแปรสุ่ม ที่ได้จากโปรแกรม SWAT-CUP จะเห็นว่า ค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรมบางพารามิเตอร์ ยังไม่สอดคล้องทฤษฎีเท่าที่ควร จึงได้ทำการ ปรับช่วงของพารามิเตอร์ใหม่ และทำการปรับเทียบ (Manual Calibration) โดยตรงจากแบบจำลอง น้ำฝน - น้ำท่า (ArcSWAT) ประมาณ 50 รอบ ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองน้ำฝน - น้ำท่า (ArcSWAT) โดยวิธี Manual Calibration

Parameter Name	Fitt-Value
1:R_CN2.mgt	74.44
2:V_ALPHA_BF.gw	0.523
3:V_GW_DELAY.gw	24.000
4:V_GWQMN.gw	504.231
5:V_ESCO.bsn	0.305
6:V_RCHRG_DP.gw	0.362
7:V_GW_REVAP.gw	36.000
8:A_SOL_AWC(..).sol	0.155
9:R_SOL_K(..).sol	13.400
10:R_CH_N2.rte	0.021

5.3.2 ผลการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลองน้ำฝน - น้ำท่า (ArcSWAT)

ในการศึกษานี้ได้กำหนดจุดสถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y.31 อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา ให้เป็นจุดทางออก (Outlet) ณ ลุ่มน้ำย่อยที่ 3 และสถานีวัดปริมาณน้ำท่า Y.14 อำเภอศรีสันาลัย จังหวัด สุโขทัย ให้เป็นจุดทางออก (Outlet) ณ ลุ่มน้ำย่อยที่ 14 โดยวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2543 - เดือนธันวาคม พ.ศ. 2556 ผลการปรับเทียบแบบจำลองระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2547 -

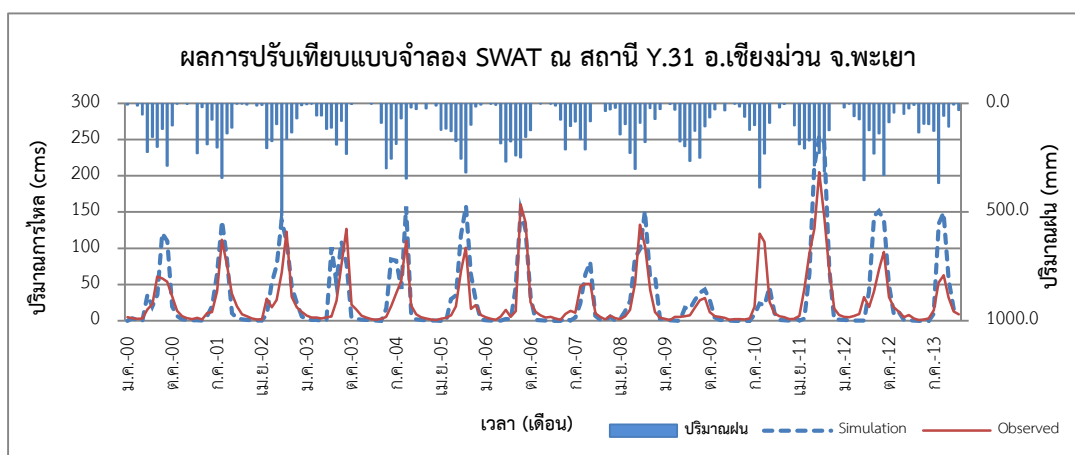
เดือนธันวาคม พ.ศ. 2551 และสอบทานแบบจำลอง ระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2543 - ธันวาคม พ.ศ. 2546 และมกราคม พ.ศ. 2552 - ธันวาคม พ.ศ. 2556 แสดงดังตารางที่ 5-4 ตารางที่ 5-5

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝน และเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าจำลองได้จากแบบจำลอง SWAT กับค่าที่วัดได้จริงจากสถานีวัด Y.31 และสถานี Y.14 แสดงดังรูปที่ 5-9 และรูปที่ 5-10 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-5 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองสำหรับปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานี Y.31

Stream Flow Calibration and Validation at Y.31			
INDEX	Calibration (2004-2008)	Validation (2000-2003)	Validation (2009-2013)
R2	0.705	0.628	0.695
NSE	0.649	0.599	0.511

จากตารางที่ 5-5 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ R^2 และค่า NSE ของปริมาณน้ำท่ารายเดือนจากการเปรียบเทียบ ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.31 มีค่าเท่ากับ 0.705 และ 0.649 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ R^2 และค่า NSE ของปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนจากการตรวจพิสูจน์ ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.31 ในช่วงมกราคม พ.ศ. 2543 - ธันวาคม พ.ศ. 2546 มีค่าเท่ากับ 0.628 และ 0.599 ตามลำดับ และการสอบทานในช่วงมกราคม พ.ศ. 2552 - ธันวาคม พ.ศ. 2556 มีค่าเท่ากับ 0.695 และ 0.511 ตามลำดับ



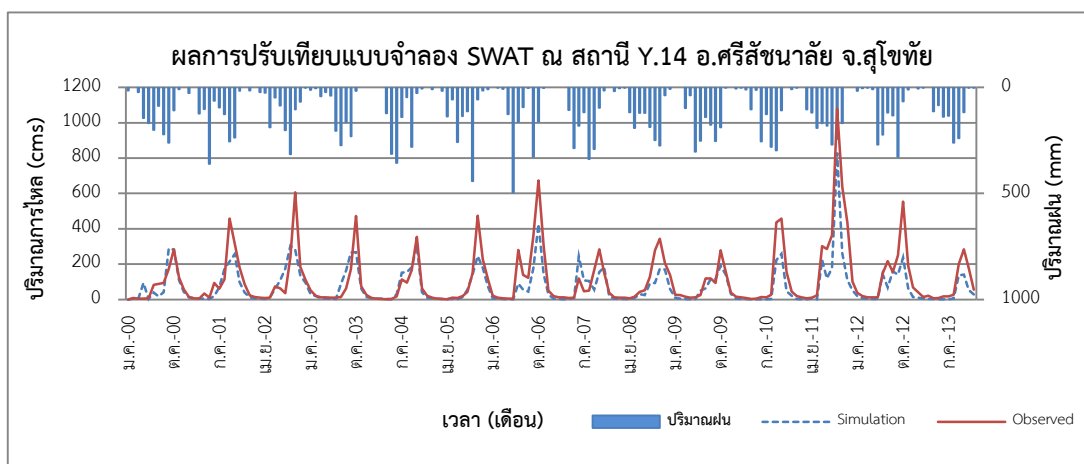
รูปที่ 5-9 ผลการเปรียบเทียบค่าปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.31

รูปที่ 5-9 แสดงผลการเปรียบเทียบและสอบทานแบบจำลอง ArcSWAT ณ สถานี Y.31 อำเภอ เชียงม่วน จังหวัดพะเยา ระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ.2546 ถึงธันวาคม พ.ศ.2556 พบว่าผลการ จำลองปริมาณน้ำท่ามีความสอดคล้องกับปริมาณน้ำท่าที่วัดได้จริง แบบจำลองมีความแม่นยำสามารถ อธิบายลักษณะการไหลในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำยมได้ดี เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวยังคงสภาพตาม ธรรมชาติ ไม่มีปัจจัยอื่นๆภายนอกบริเวณสภาพทางอุทกวิทยา เช่น ฝาย หรือ อ่างเก็บน้ำ เป็นต้น

ตารางที่ 5-6 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองสำหรับปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานี Y.14

Stream Flow Calibration and Validation at Y.14			
INDEX	Calibration (2004-2008)	Validation (2000-2003)	Validation (2009-2013)
R2	0.716	0.638	0.77
NSE	0.673	0.622	0.695

จากตารางที่ 5-6 ค่าสัมประสิทธิ์ R^2 และค่า NSE ของปริมาณน้ำท่ารายเดือนจากการ ปรับเทียบแบบจำลอง ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.14 มีค่าเท่ากับ 0.716 และ 0.673 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ R^2 และค่า NSE ของปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนของการสอบทาน ณ สถานี ตรวจวัดน้ำท่า Y.14 ระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2543 - ธันวาคม พ.ศ. 2546 เท่ากับ 0.638 และ 0.622 ตามลำดับ และการสอบทานในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2552 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2556 เท่ากับ 0.77 และ 0.695 ตามลำดับ



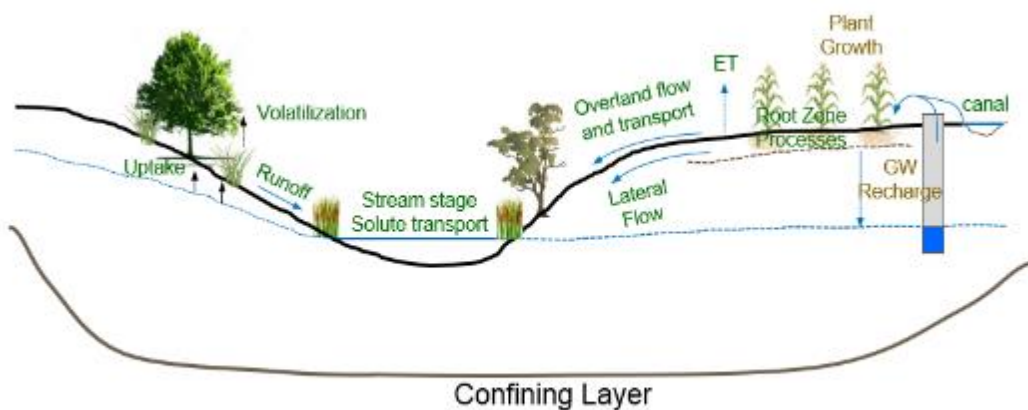
รูปที่ 5-10 ผลการเปรียบเทียบค่าปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.14

รูปที่ 5-10 แสดงผลการเปรียบเทียบและสอบทานแบบจำลอง ArcSWAT ณ สถานี Y.14 อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย ระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ.2546 ถึงธันวาคม พ.ศ.2556 พบว่าผลการจำลองปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับปริมาณน้ำท่าที่วัดได้จริง เพียงแต่ปริมาณการไหลสูงสุดจากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าปริมาณการไหลที่วัดได้จริงเล็กน้อย

หากเปรียบเทียบผลการเปรียบเทียบและสอบทานปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง ArcSWAT ทั้ง 2 สถานี พบว่าผลการจำลองที่สถานี Y.14 มีความแม่นยำต่ำกว่าสถานี Y.31 เล็กน้อย เนื่องจากพื้นที่ตอนกลางของกลุ่มน้ำ มีปัจจัยอื่นๆ ที่อยู่นอกเหนือขอบเขตของแบบจำลอง เช่น การสูบน้ำจากแม่น้ำไปใช้ หรือการสูบน้ำไปยังกลุ่มน้ำอื่น เป็นต้น จึงทำให้ผลจากแบบจำลองเกิดความคลาดเคลื่อน

5.4 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น (Groundwater Recharge)

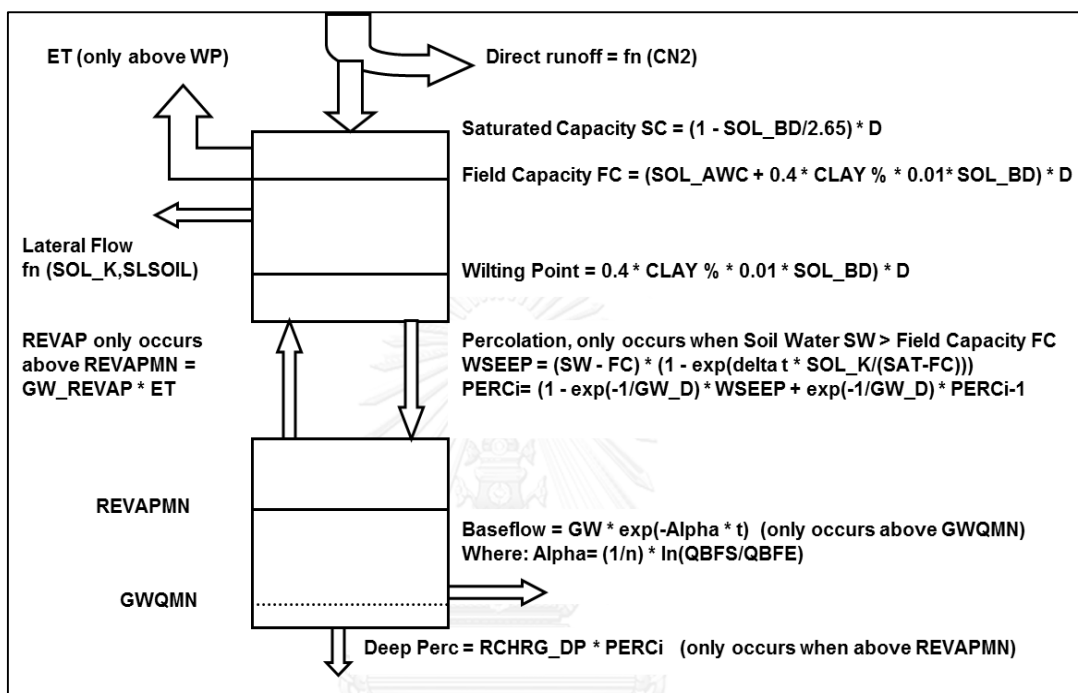
แบบจำลอง ArcSWAT เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองระบบอุทกวิทยา โดยมีพื้นฐานการคำนวณจากสมการสมดุลน้ำ (Water Balance Equation) ทั้งในรูปแบบลุ่มน้ำย่อย (Subbasin) และรูปแบบกริด (Grid) ดังรูปที่ 5-11



รูปที่ 5-11 องค์ประกอบทางอุทกวิทยาที่แบบจำลอง ArcSWAT คำนวณได้

ตามที่ได้ทำการเปรียบเทียบและสอบทานปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลองกับปริมาณน้ำท่าที่วัดได้จริง ณ สถานี Y.31 และสถานี Y.14 พบว่าแบบจำลองสามารถอธิบายลักษณะทางอุทกวิทยาได้ดีนั้น

ในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้นำพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลอง ArcSWAT โดยมีพื้นฐานการคำนวณดังรูปที่ 5-12 เพื่อวิเคราะห์ผลการศึกษา ประกอบด้วย การศึกษาปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย และปริมาณการไหลพื้นฐานของน้ำใต้ดินที่ไหลออกสู่มแม่น้ำยม มีผลการศึกษาดังนี้



รูปที่ 5-12 แบบจำลอง ArcSWAT เชียงโมโนทัศน์

5.4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลรายเดือน (Monthly Groundwater Recharge)

ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นเฉลี่ยรายเดือน ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ที่ได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT ซึ่งเป็นปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นจากทั้งน้ำฝนและน้ำในแม่น้ำ โดยมีพื้นฐานการคำนวณจากสมการสมดุลน้ำ (Water Balance Equation) ในรูปแบบกริด (Grid) ระหว่างปี พ.ศ. 2543 - 2556

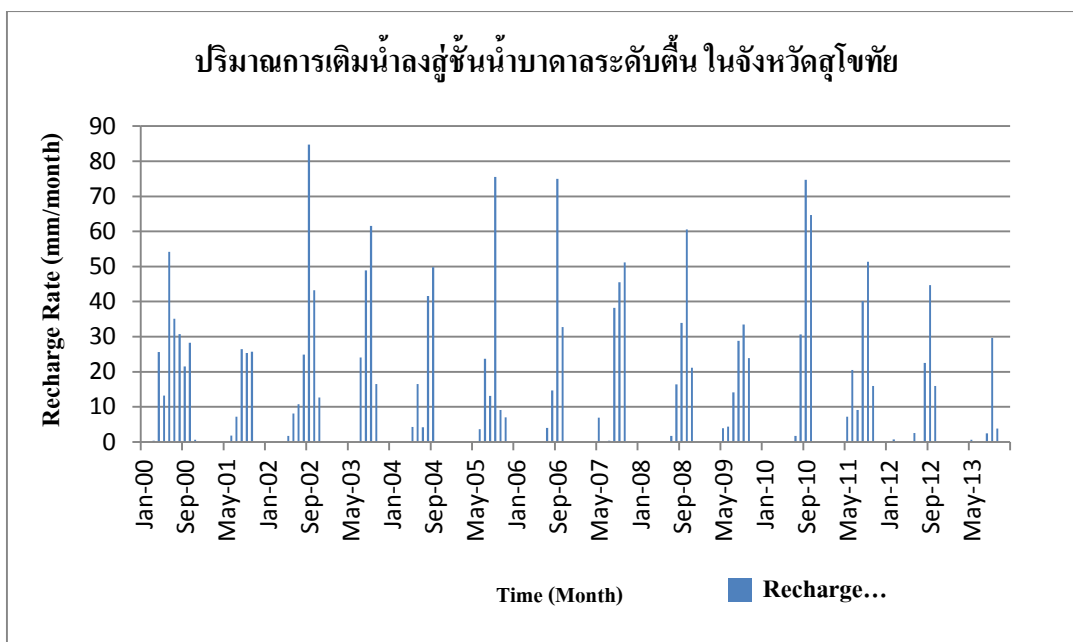
ในการศึกษาครั้งนี้วิเคราะห์ผลการจำลองในลักษณะค่าเฉลี่ยรายเดือนในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย เพื่อศึกษาลักษณะการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นในแต่ละเดือน สัดส่วนการเติมน้ำในฤดูฝนและฤดูแล้ง อีกทั้งยังได้ศึกษาปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นรายปี ในปี พ.ศ. 2543 - 2556 ดังแสดงในตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5-7 ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น พื้นที่จังหวัดสุโขทัย

ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล พื้นที่จังหวัดสุโขทัย (มิลลิเมตร)														
Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	รวม	ล้าน ลบ.ม.
2543	0.0	0.0	0.3	25.6	13.2	54.2	35.1	30.7	21.5	28.3	0.6	0.0	209.5	1,381.98
2544	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	7.2	26.4	25.3	25.7	0.0	0.0	86.4	569.98
2545	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	8.1	10.7	24.9	84.7	43.2	12.7	0.0	186.1	1,227.22
2546	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.1	48.9	61.6	16.5	0.0	0.0	151.1	996.35
2547	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	16.5	4.2	41.6	49.8	0.0	0.0	0.0	116.3	767.19
2548	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	23.7	13.1	75.5	9.1	7.0	0.0	132.1	871.01
2549	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	14.7	75.0	32.7	0.0	0.0	126.4	833.79
2550	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	0.0	0.3	38.2	45.5	51.2	0.0	0.0	142.1	937.43
2551	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	16.4	33.9	60.6	21.1	0.0	133.6	880.93
2552	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	4.4	14.1	28.8	33.5	23.9	0.0	0.0	108.6	716.43
2553	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	30.6	74.7	64.7	0.0	0.0	171.6	1,132.04
2554	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	20.5	9.1	40.1	51.3	15.9	0.0	0.0	144.1	950.54
2555	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	22.5	44.7	15.9	0.0	0.0	86.2	568.73
2556	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.1	2.4	29.6	3.8	0.0	0.0	36.6	241.54
เฉลี่ย	0.0	0.0	0.0	2.2	2.9	8.7	10.2	27.5	50.8	28.4	3.0	0.0	133.7	882.05

CHULALONGKORN UNIVERSITY

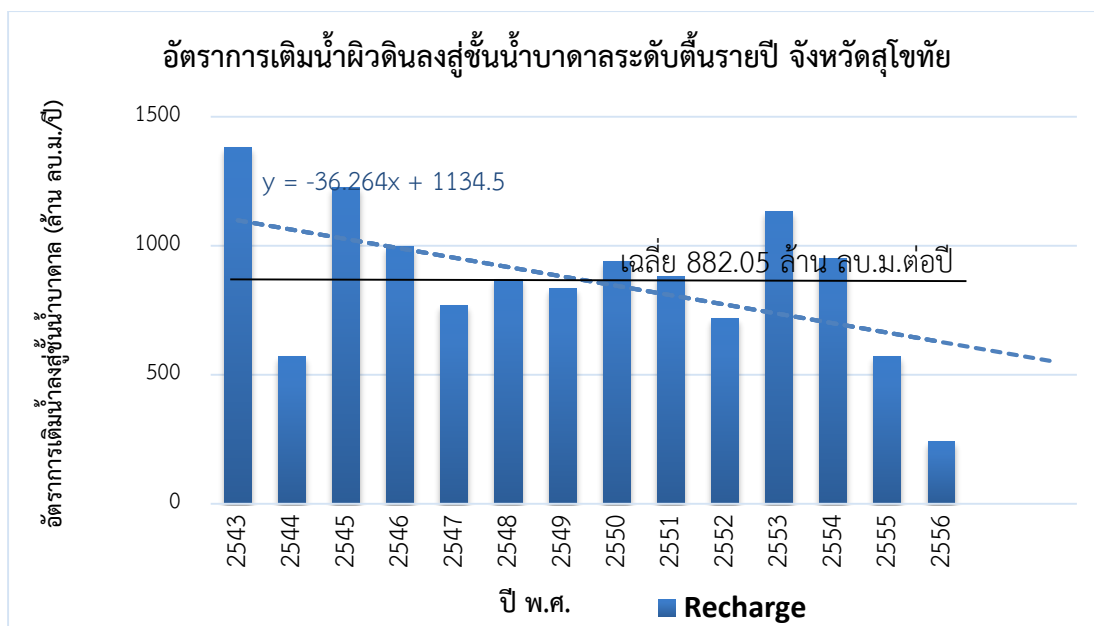
จากตาราง 5-7 พบว่าปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลรายปีเฉลี่ย ในช่วง พ.ศ. 2543 ถึง ปี พ.ศ. 2556 เท่ากับ 133.7 มิลลิเมตร หรือ 882.05 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 11.06 ของ ปริมาณน้ำฝน และปี พ.ศ. 2543 มีปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลสูงสุดรายปี เท่ากับ 209.5 มิลลิเมตร หรือ 1,381.98 ล้านลูกบาศก์เมตร ปี พ.ศ. 2556 มีปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ต่ำสุดรายปี เท่ากับ 36.6 มิลลิเมตร หรือ 241.54 ล้านลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 5-13 ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นรายเดือน จังหวัดสุโขทัย

จากรูปที่ 5-13 เป็นผลลัพธ์จากแบบจำลองน้ำฝน - น้ำท่า ในพื้นที่ลุ่มน้ำยม เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย พบว่า จะเกิดการไหลเติมในช่วงฤดูฝนร้อยละ 94 จากปริมาณการไหลเติมตลอดทั้งปี และมีค่าสูงที่สุดในช่วงเดือนกันยายน ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับปริมาณฝนที่ตกในช่วงนั้นๆ โดยมีปริมาณการเติมน้ำสูงสุดในเดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2545 เท่ากับ 84.7 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5-13 ในแต่ละปีจะมีรูปแบบ (Seasonal) คล้ายกัน จะแตกต่างกันบ้าง ในลักษณะของการกระจายตัว ซึ่งอาจเกิดจากความเข้มของฝนที่แตกต่างกัน หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 5-14 ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นรายปี จังหวัดสุโขทัย

จากรูปที่ 5-14 พบว่าปริมาณการเติมน้ำผิวดินลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นรายปี จากปี พ.ศ. 2543 ถึง ปี พ.ศ. 2556 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 882.05 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นในจังหวัดสุโขทัย พบว่ากรมทรัพยากรน้ำบาดาล ปี พ.ศ.2553 ได้ประเมินปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลเฉลี่ยรายปี พื้นที่จังหวัดสุโขทัย มีค่าเท่ากับ 908 ล้านลูกบาศก์เมตร ดังนั้นผลการศึกษาจากแบบจำลอง ArcSWAT ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาดังกล่าว

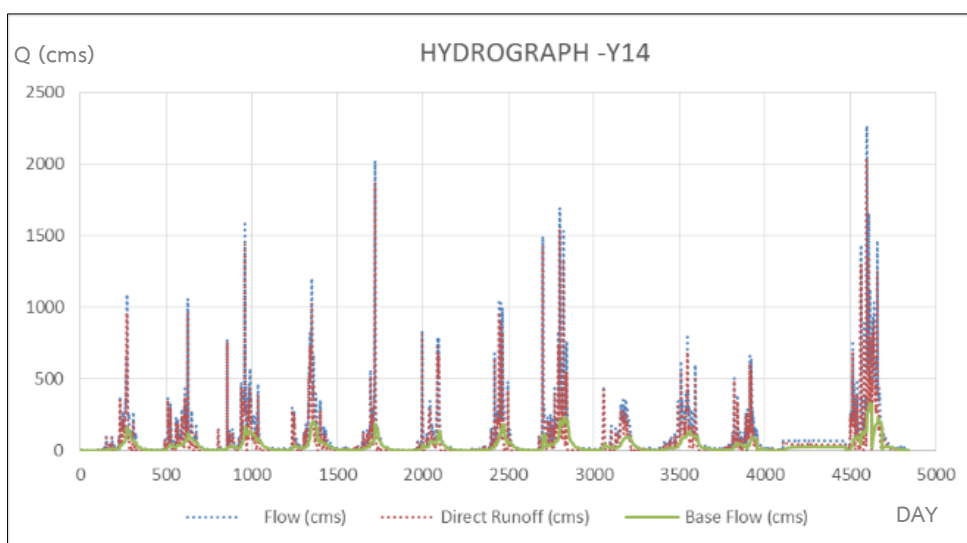
5.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow)

ในช่วงฤดูแล้งลำน้ำหลายสายมีปริมาณการไหลในลำน้ำลดลงถึงแห้งขอดแตกต่างกันไป เนื่องจากมีปริมาณฝนตกน้อย ในบางแห่งยังมีปริมาณการไหลที่เพียงพอหล่อเลี้ยงประชากรริมฝั่งที่ต้องการใช้น้ำและรักษาระบบนิเวศน์ แต่ในบางแห่งมีลักษณะแห้งขอด ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะอุทกวิทยาของแม่น้ำนั้นๆ

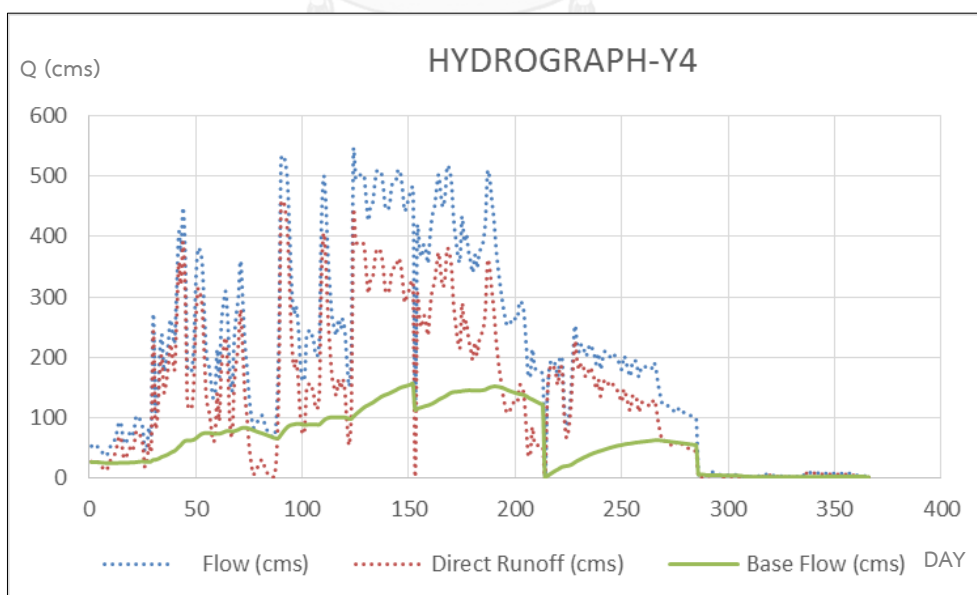
ในการศึกษาครั้งนี้ได้สังเกตเห็นความสำคัญของปริมาณการไหลของลำน้ำในช่วงเวลาต่างๆ โดยเฉพาะในฤดูแล้ง ปริมาณการไหลในลำน้ำส่วนใหญ่เป็นการไหลของน้ำใต้ดินออกสู่แม่น้ำ จึงได้ประยุกต์ใช้ผลจากแบบจำลอง ArcSWAT และผลจากการคำนวณปริมาณการไหลพื้นฐานด้วยวิธี Automated Recursive Digital Filter เพื่อศึกษาศักยภาพของปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ในพื้นที่ลุ่มน้ำยม โดยมีผลการศึกษาดังนี้

5.5.1 การวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน (flow) โดยแบบจำลอง SWAT

ปริมาณการไหลพื้นฐานเฉลี่ยรายเดือน ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ที่ได้จากแบบจำลอง SWAT ในช่วงปี พ.ศ. 2543 ถึงปี พ.ศ. 2556 ณ สถานี 14 อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย และ สถานี Y.4 อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ดังแสดงในรูปที่ 5-15 และรูปที่ 5-16 ตามลำดับ



รูปที่ 5-15 กราฟปริมาณน้ำท่าและปริมาณการไหลพื้นฐาน ณ สถานี Y.14 อ. ศรีสัชนาลัย จ. สุโขทัย



รูปที่ 5-16 กราฟปริมาณน้ำท่าและปริมาณการไหลพื้นฐาน ณ สถานี Y.4 อ. เมือง จ. สุโขทัย

จากรูปที่ 5-15 และรูปที่ 5-16 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ที่ได้จากแบบจำลอง SWAT ในช่วงปีพุทธศักราช 2543 ถึงปีพุทธศักราช 2556 ณ สถานี 14 อำเภอศรีสัชชนาลัย จังหวัดสุโขทัย และ สถานี Y.4 อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย พบว่า ณ ที่สถานี Y.14 มีปริมาณการไหลพื้นฐานตลอดทั้งปีและยังคงมีปริมาณการไหลพื้นฐานออกสู่แม่น้ำยมในช่วงฤดูแล้ง โดยตลอดทั้งปีเฉลี่ย เท่ากับ 35.84 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที คิดเป็นร้อยละ 34.1 ของการไหลในแม่น้ำทั้งหมด ซึ่งแตกต่างจากสถานี Y.4 ที่มีปริมาณการไหลพื้นฐานค่อนข้างน้อย หรือไม่มีปริมาณการไหลในช่วงฤดูแล้ง สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยองค์ประกอบไอโซโทปเสถียร และสภาพลำน้ำที่เกิดขึ้นจริงที่สังเกตการณ์ในช่วงออกสำรวจภาคสนาม โดยตลอดทั้งปีเฉลี่ย เท่ากับ 23.97 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที คิดเป็นร้อยละ 32.4 ของการไหลในแม่น้ำทั้งหมด

5.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน (flow) โดยวิธี Automated Recessive Digital Filter

การไหลในลำน้ำจะมีค่าสูงในฤดูฝน ปริมาณการไหลจะได้จากฝนโดยตรงหรือปริมาณน้ำท่าผิวดิน (direct runoff) ส่วนการไหลในฤดูแล้งเป็นการไหลพื้นฐาน (baseflow) ซึ่งเป็นน้ำที่มาจากน้ำใต้ดิน ใน (Lacey & Grayson, 1998) การประเมินศักยภาพการเก็บกักน้ำของพื้นที่ลุ่มน้ำยม โดยการแยกการไหลพื้นฐานออกจากการไหลในลำน้ำหรือปริมาณน้ำท่า (runoff) เรียกว่า วิธีดัชนีการไหลพื้นฐาน (Base Flow Index) ซึ่งจะให้ค่าตัวเลขของสภาพการไหลของน้ำใต้ดิน ค่าดัชนีการไหลพื้นฐานเป็นปัจจัยตัวหนึ่งที่ใช้ในการประเมินศักยภาพของการเก็บกักน้ำของพื้นที่ได้ ในการแยกการไหลพื้นฐานได้ใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ โดยการสร้างชุดฟังก์ชันใน M-file เนื่องจากการแยกการไหลพื้นฐานต้องใช้ข้อมูลอัตราการไหลรายวันเป็นจำนวนมากที่ต่อเนื่องกันหลายๆปี ลุ่มน้ำยมเป็นลุ่มน้ำย่อยหลักของลุ่มน้ำเจ้าพระยา ตั้งอยู่ทางตอนเหนือของประเทศไทย ลักษณะลุ่มน้ำวางตัวตามแนวเหนือ-ใต้ มีพื้นที่ลุ่มน้ำรวมทั้งสิ้น 23,618 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ 11 จังหวัด ได้แก่ พะเยา น่าน ลำปาง แพร่ ตาก กำแพงเพชร สุโขทัย อุตรดิตถ์ พิษณุโลก พิจิตร และนครสวรรค์ รวมความยาวตลอดลำน้ำประมาณ 735 กิโลเมตร สภาพลำน้ำยมจะมีลักษณะเป็นรูปคอกขวด ความจุลุ่มน้ำของแม่น้ำยม ตั้งแต่ต้นน้ำถึงอำเภอเมืองสุโขทัยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 800 ถึง 2,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และตั้งแต่อำเภอเมืองสุโขทัยลงมาจะมีค่าความจุของลำน้ำลดลงเหลือ 300 ถึง 500 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ดังนั้น วัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อทำการวิเคราะห์และประเมินค่าดัชนีการไหลพื้นฐานในลุ่มน้ำยม ด้วยวิธีการสร้างสมการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้สถานีตรวจวัดน้ำท่าเพื่อพิจารณาการไหลพื้นฐานจำนวน 9 สถานี จังหวัดแพร่ 3 สถานี จังหวัดสุโขทัย 4 สถานี และจังหวัดพิจิตร 2 สถานี ได้แก่ สถานี Y31 สถานี Y20 สถานี Y1C สถานี Y14 สถานี Y6 สถานี Y3A สถานี Y4 สถานี Y16 สถานี Y17 จากต้นน้ำถึงท้ายน้ำตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5-17

โดยการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้นำโปรแกรม MATLAB 2016R มาช่วยในการคำนวณ โดยการสร้างชุดฟังก์ชัน เพื่อคำนวณหาปริมาณการไหลพื้นฐานโดยใช้สมการ Regression จากทฤษฎีของ (Arnold et al., 1995) ดังสมการที่ 5-1 และ 5-2

$$q_t = B(q_{t-1}) + [(1+B)/2 * (Q_t - Q_{t-1})] \quad (5-1)$$

$$B_t = Q_t - q_t \quad (5-2)$$

โดย q_t = Filter Surface Runoff (m^3/s)

B = Filter Parameter

Q_t = Streamflow (m^3/s)

B_t = Baseflow (m^3/s)

การวิเคราะห์ค่าตัวเลขดัชนีการไหลพื้นฐาน (Base Flow Index, BFI) คืออัตราส่วนของปริมาณการไหลพื้นฐานต่อปริมาณการไหลในลำน้ำหรือปริมาณน้ำท่าทั้งหมด (Kirk and Charles, 1999) ดังสมการที่ 5-3

$$\text{Base Flow Index (BFI)} = \text{Baseflow Area} / \text{Total Hydrograph Area} \quad (5-3)$$

โดย $\text{Baseflow Area} = \text{พื้นที่ใต้กราฟปริมาณการไหลพื้นฐาน}$

$\text{Total Hydrograph Area} = \text{พื้นที่ใต้กราฟปริมาณการไหลรวมในลำน้ำ}$

โปรแกรมที่เขียนโดย MATLAB จะถูกจัดเก็บให้อยู่ในรูปของนามสกุล .m ซึ่งนิยมเรียกโปรแกรมที่เขียนโดยใช้ MATLAB ว่า M-file โดย M-file นี้จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ เขียนในลักษณะของการบอกขั้นตอนหรือบอกบทการทำงานหรือที่นิยมเรียกว่า Script File และอีกประเภทหนึ่งจะเขียนขึ้นในลักษณะของฟังก์ชัน ซึ่งผู้ใช้สามารถรวบรวมเอาฟังก์ชันต่าง ๆ ของ MATLAB รวมเข้าด้วยกัน แล้วเขียนขึ้นเป็นฟังก์ชันใหม่ M-file โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5-8 ชุดโปรแกรมสมการ Recurve Regression Analysis เพื่อใช้วิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน

ชุดโปรแกรมสมการ Recurve Regression Analysis เพื่อใช้วิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน
<pre>function basef = baseflow(sflow) sflow = [DATE FLOW]; f1 = .95; f2 = (1+f1) / 2; time = sflow(:,1); surfq = sflow(:,2); surfqQ = sflow(:,2); basef = repmat(surfqQ,[1 5]); surfq(1) = surfqQ(1) * .5; basef(1,1) = surfqQ(1) - surfq(1); basef(1,2) = basef(1,1);</pre>

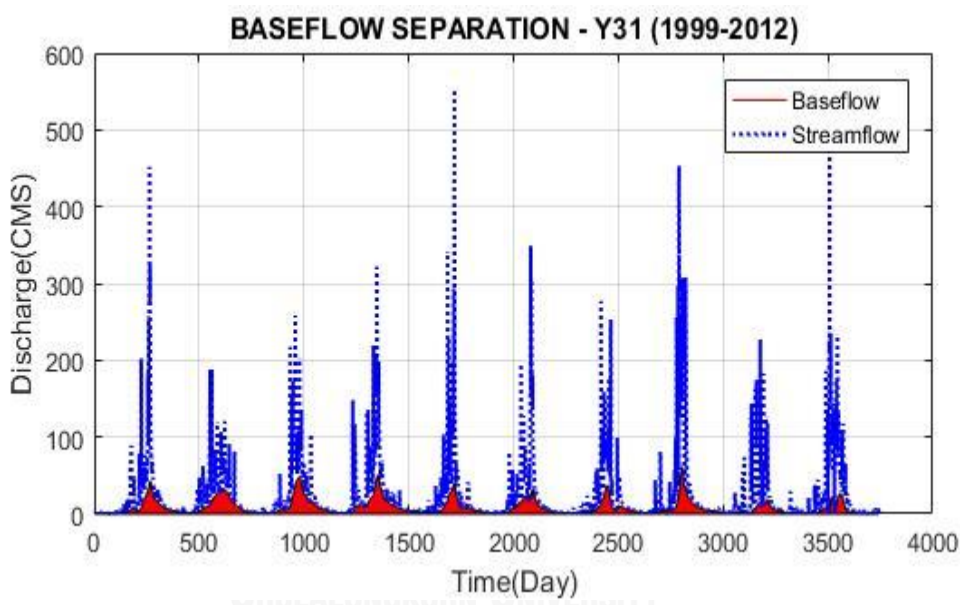
```

basef(1,3) = basef(1,1);
basef(:,4) = time;
basef(:,5) = surfqQ;
% first pass (forward)
for i = 2:length(surfqQ)
    surfq(i) = f1 * surfq(i-1) + f2 * (surfqQ(i) - surfqQ(i-1));
    if surfq(i) < 0
        surfq(i) = 0;
    end
    basef(i,1) = surfqQ(i) - surfq(i);
    if basef(i,1) < 0
        basef(i,1) = 0;
    end
    if basef(i,1) > surfqQ(i)
        basef(i,1) = surfqQ(i);
    end
end
% second pass (backward)
basef(end-1,2) = basef(end-1,1);
for i = [length(surfqQ)-2:-1:1]
    surfq(i) = f1 * surfq(i+1) + f2 * (basef(i,1) - basef(i+1,1));
    if surfq(i) < 0
        surfq(i) = 0;
    end
    basef(i,2) = basef(i,1) - surfq(i);
    if basef(i,2) < 0
        basef(i,2) = 0;
    end
    if basef(i,2) > basef(i,1)
        basef(i,2) = basef(i,1);
    end
end
% third pass (forward)
basef(end-1,3) = basef(end-1,1);
for i = 2:length(surfqQ)
    surfq(i) = f1 * surfq(i-1) + f2 * (basef(i,2) - basef(i-1,2));
    if surfq(i) < 0
        surfq(i) = 0;
    end
    basef(i,3) = basef(i,2) - surfq(i);
    if basef(i,3) < 0
        basef(i,3) = 0;
    end
    if basef(i,3) > basef(i,2)
        basef(i,3) = basef(i,2);
    end
end
end
Bf=basef(:,3);
Tf=sflow(:,2);
plot(time,Qb,time,Tf);
title('BASEFLOW SEPARATION Y3A (1999-2012)');
xlabel('Time (Day) ');
ylabel('Discharge (CMS) ');
Areat = trapz(time,Tf)
Areab = trapz(time,Bf)
BFI = Areat/Areab
end

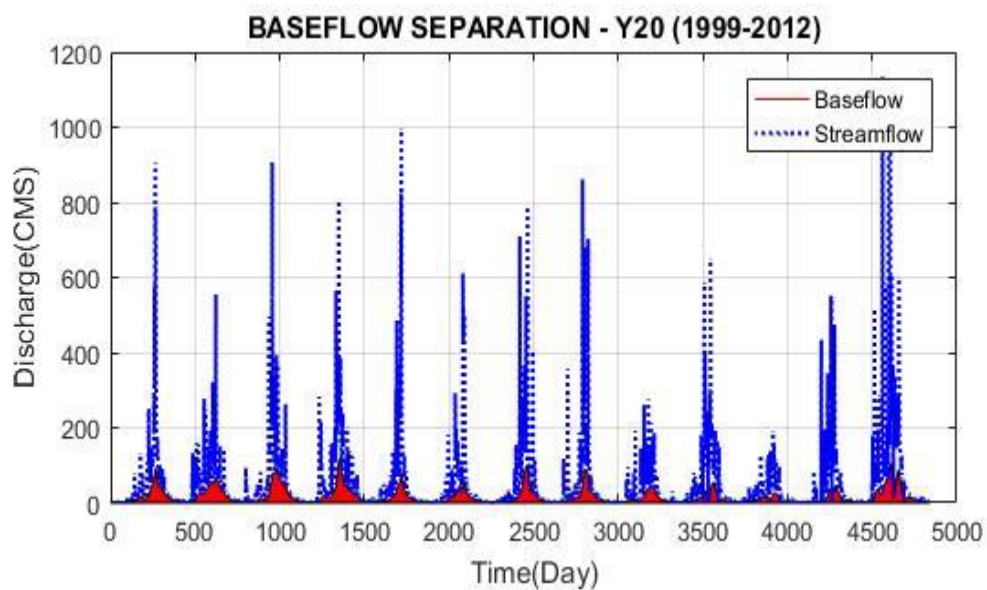
```

1) ปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow)

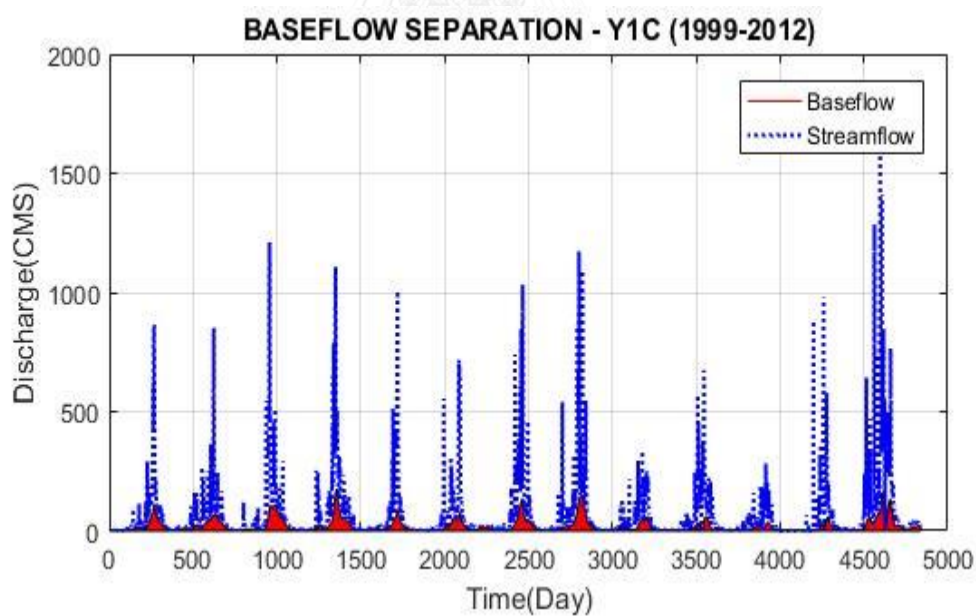
ผลการคำนวณปริมาณการไหลพื้นฐานในแม่น้ำยม สามารถคำนวณได้จากการแยกปริมาณการไหลผิวดินโดยตรง (Direct Runoff) ออกจากปริมาณการไหลในลำน้ำรวม (Stream Flow) ซึ่งจะได้ปริมาณการไหลน้ำใต้ดินในแต่ละสถานี พบว่าปริมาณการไหลน้ำใต้ดินเรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ สถานี Y.16, Y.17, Y3A, Y.14, Y.4, Y.6, Y.1C, Y.20 และ Y.31 มีค่าเท่ากับ 72.22, 59.66, 36.70, 36.49, 35.08, 24.73, 19.54, 15.92 และ 8.14 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 5-17



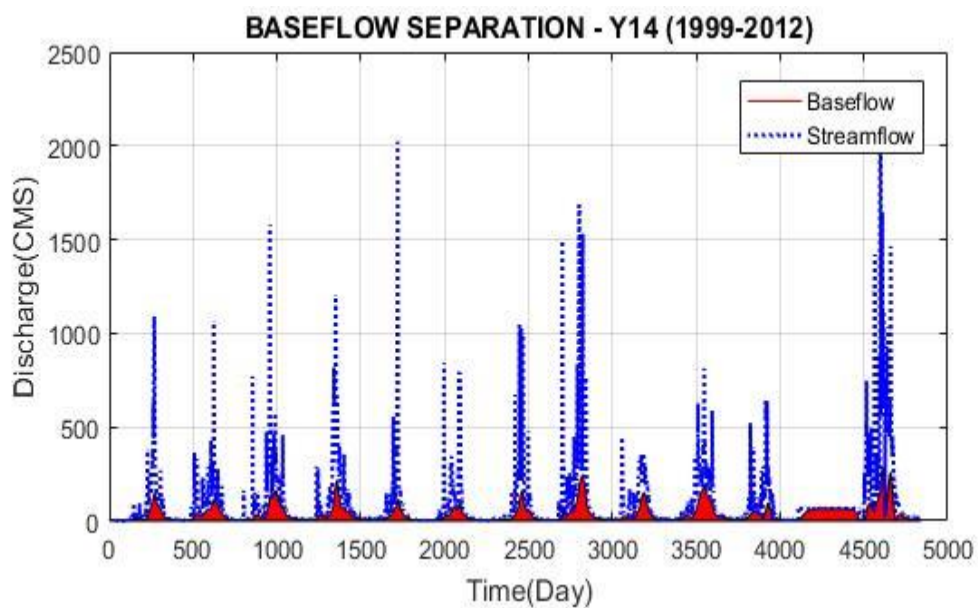
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y3A อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา



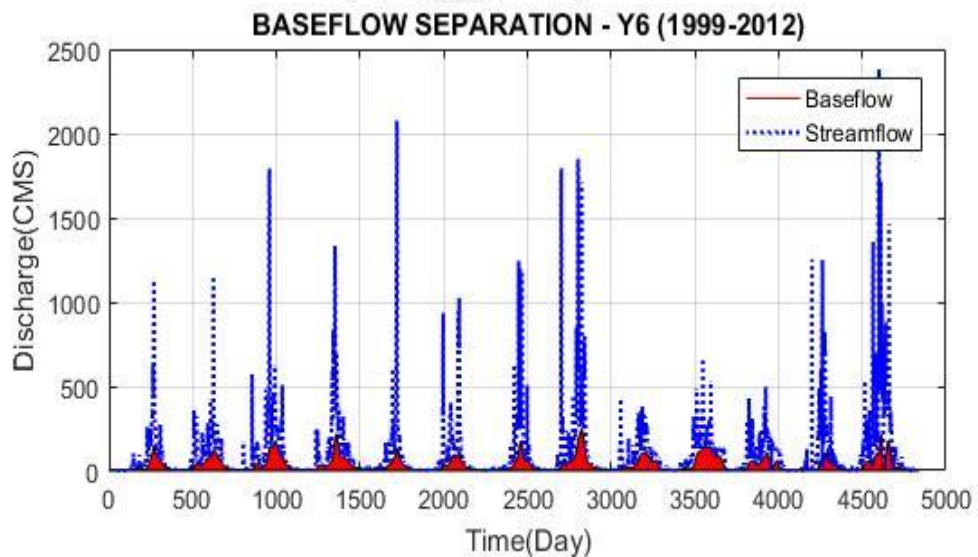
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y20 อำเภอสอง จังหวัดแพร่



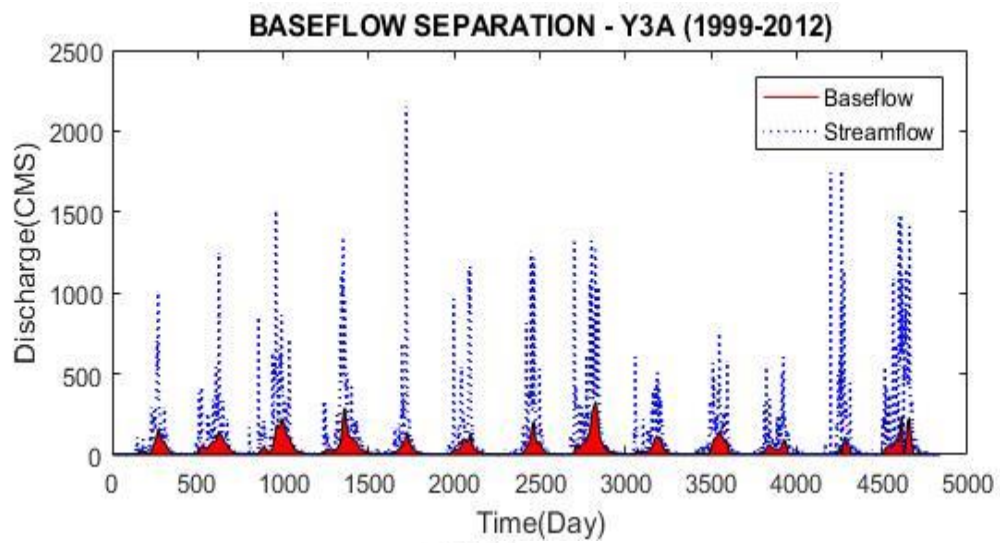
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y1C อำเภอเมือง จังหวัดแพร่



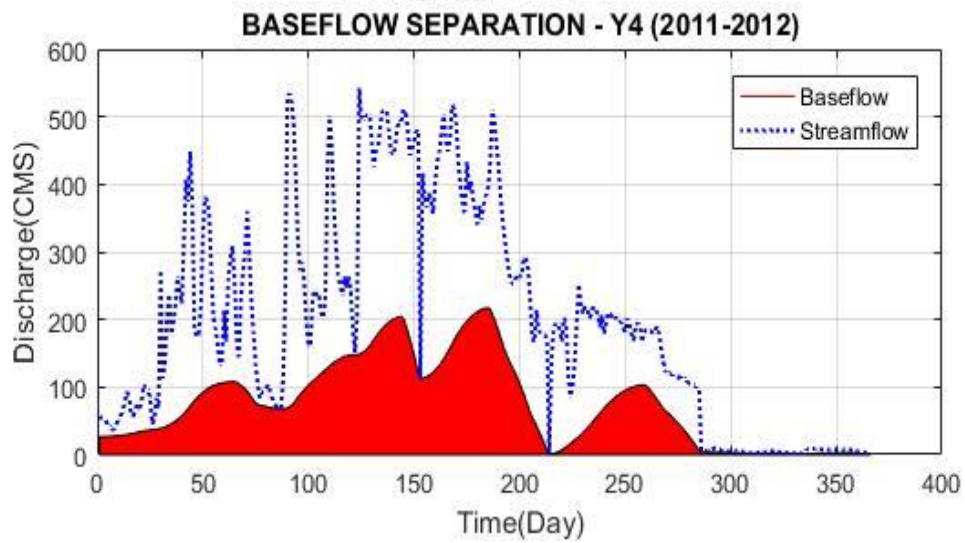
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y14 อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย



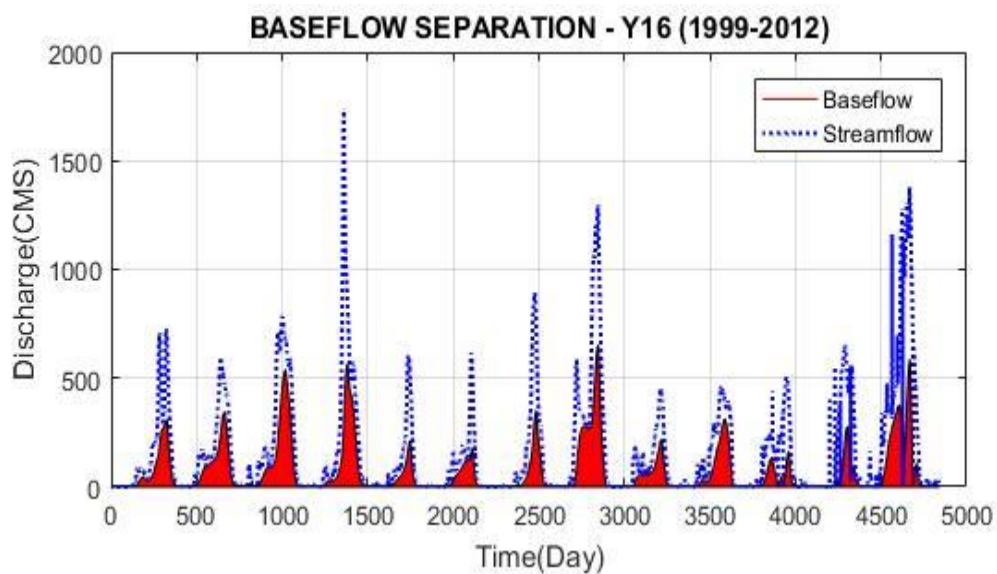
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y6 อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย



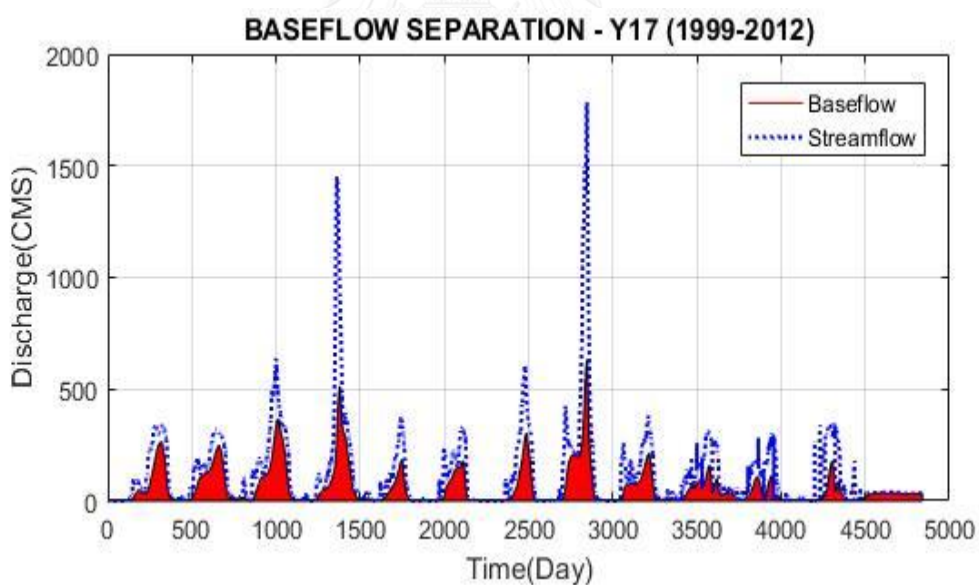
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y3A อำเภอสรรคโลก จังหวัดสุโขทัย



สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y4 อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย



สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y16 อําเภอบางระกํา จังหวัดพิษณุโลก



สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y17 อําเภอสว่างมํา จังหวัดพิจิตร

รูปที่ 5-18 ปริมาณการไหลพื้นฐานในแต่ละสถานี

2) ดัชนีการไหลพื้นฐาน (Baseflow Index, BFI)

ดัชนีการไหลพื้นฐาน คือ สัดส่วนของปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ต่อปริมาณการไหลในลำน้ำรวม (Streamflow)

ผลการคำนวณค่าดัชนีการไหลพื้นฐานของแต่ละสถานี พบว่า ค่าดัชนีการไหลพื้นฐานที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่สถานี Y.17 และ Y.1C มีค่าเท่ากับ 0.475 และ 0.275 ตามลำดับ เมื่อดัชนีการไหลพื้นฐานมีค่าสูง หมายถึงพื้นที่รับน้ำนี้มีศักยภาพการกักเก็บสูง ดังแสดงในตารางที่ 5-9

ตารางที่ 5-9 ค่าดัชนีการไหลพื้นฐาน (Baseflow Index, BFI)

สถานี วัด ผู้ทำ	พื้นที่รับน้ำ (ตร.กม.)	ปริมาณการไหล พื้นฐาน (ลบ.ม/วินาที)	ปริมาณการไหล ในลำน้ำรวม (ลบ.ม/วินาที)	Baseflow Index (BFI)	จำนวน ปี	ช่วงปี ค.ศ.
Y.31	2,594	8.14	25.003	0.326	11	1999-2009
Y.20	5,410	15.92	51.975	0.306	14	1999-2012
Y.1C	7,624	19.54	71.002	0.275	14	1999-2012
Y.14	12,131	36.49	105.106	0.347	14	1999-2012
Y.6	12,658	35.08	109.044	0.322	14	1999-2012
Y.3A	13,583	36.70	119.941	0.306	14	1999-2012
Y.4	17,731	24.73	197.482	0.328	2	2011-2012
Y.16	19,952	72.22	170.068	0.425	14	1999-2012
Y.17	21,415	59.66	125.463	0.475	14	1999-2012

จากตารางที่ 5-9 ปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) แสดงถึงศักยภาพของน้ำบาดาลที่ไหลออกสู่ลำน้ำ เมื่อเทียบกับปริมาณการไหลในลำน้ำรวม (Streamflow) จะได้สัดส่วนปริมาณการไหลพื้นฐานต่อปริมาณการไหลในลำน้ำรวม จากการศึกษาดังกล่าวข้างต้นพบว่า ค่าดัชนีการไหลของกลุ่มน้ำยมเฉลี่ยทั้งลำน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.345 ซึ่งจากการทบทวนการศึกษาที่เกี่ยวข้อง ได้มีผู้ศึกษาดัชนีการไหลของกลุ่มน้ำยม โดย (สวัสดีปุรุ, 2012) ซึ่งใช้ข้อมูลปี 2008 ในการศึกษาดังกล่าวสรุปไว้ว่า ดัชนีการไหลพื้นฐาน (Baseflow Index) ของกลุ่มน้ำยม มีค่าเท่ากับ 0.29 ซึ่งถือว่าผลการศึกษาในครั้งนี้ใกล้เคียงกับผลการศึกษาดังกล่าว

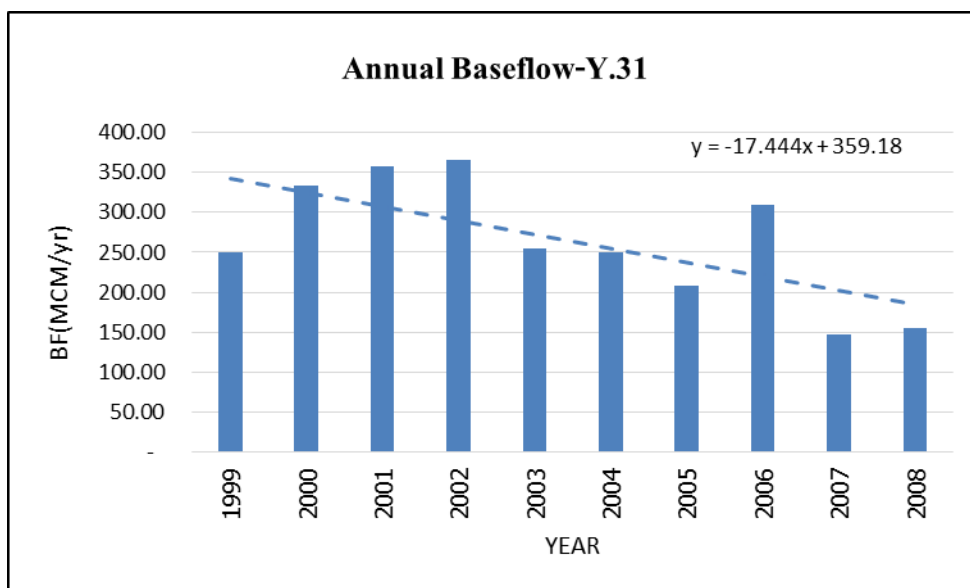
3) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการไหลพื้นฐานเฉลี่ยรายปี

ผลจากการแยกการไหลพื้นฐานออกจากกราฟอุทกการไหลในแม่น้ำยม (Baseflow Separation) ได้คำนวณปริมาตรการไหลน้ำใต้ดินในแต่ละปี พบว่า สถานีที่มีแนวโน้มปริมาณการไหลน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ Y.14 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึง 63.9 ล้าน ลบ.ม.ต่อปี และสถานีที่มีแนวโน้มปริมาณการไหลน้ำพื้นฐานลดลงที่สุด คือ Y.17 มีแนวโน้มลดลงถึง 146.96 ล้าน ลบ.ม.ต่อปี ดังแสดงในตารางที่ 5-10 และรูปที่ 5-18

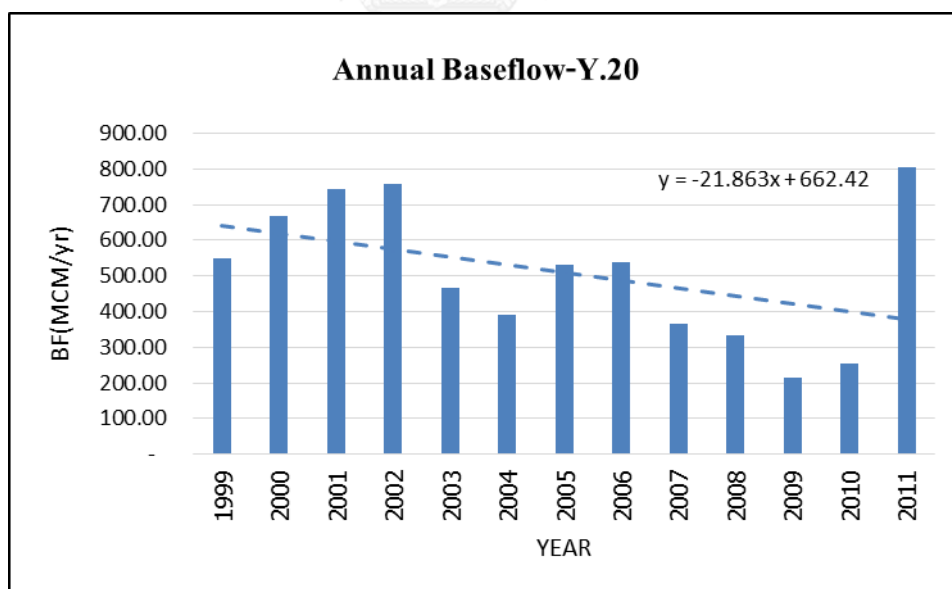
ตารางที่ 5-10 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำใต้ดิน

สถานีวัด น้ำท่า	พื้นที่รับน้ำ (ตร.กม.)	จำนวนปี	ช่วงปี ค.ศ.	แนวโน้มปริมาณการไหลพื้นฐาน (ล้าน ลบ.ม./ปี)
Y.31	2,594	11	1999-2009	-17.44
Y.20	5,410	14	1999-2012	-21.86
Y.1C	7,624	14	1999-2012	-15.91
Y.14	12,131	14	1999-2012	63.9
Y.6	12,658	14	1999-2012	5.86
Y.3A	13,583	14	1999-2012	-34.19
Y.16	19,952	14	1999-2012	-34
Y.17	21,415	14	1999-2012	-146.96

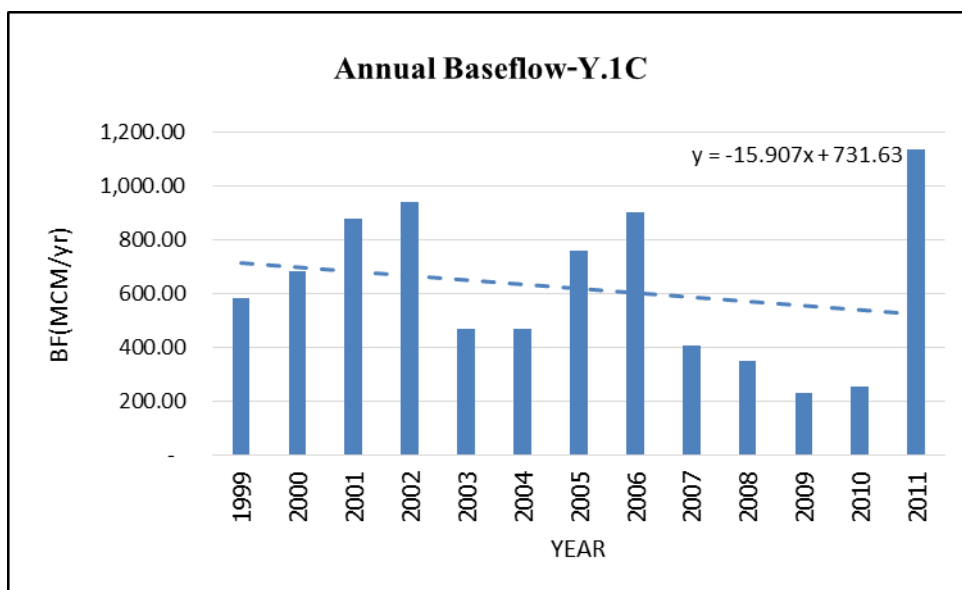
จากตารางที่ 5-10 เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของปริมาณการไหลพื้นฐานรายปี ในช่วงปี พ.ศ. 2542-2555 พบว่า ปริมาณการไหลพื้นฐานของแต่ละสถานีตรวจวัดน้ำท่าในลุ่มน้ำยม มีแนวโน้มลดลงเสียส่วนใหญ่ ประกอบด้วย สถานี Y17 Y3A Y16 Y20 Y31 และ Y1C ตามลำดับ โดยสถานี Y17 มีแนวโน้มปริมาณการไหลพื้นฐานลดลง 146.96 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี อันเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของการใช้ประโยชน์ที่ดิน หรือสภาพทางอุทกธรณีวิทยา อีกทั้งปริมาณฝนที่ตกน้อยลง ทำให้ปริมาณการไหลพื้นฐานลดลงด้วย โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการไหลพื้นฐานที่ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่าต่างๆในลุ่มน้ำยม เรียงจากต้นน้ำไปท้ายน้ำตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-19



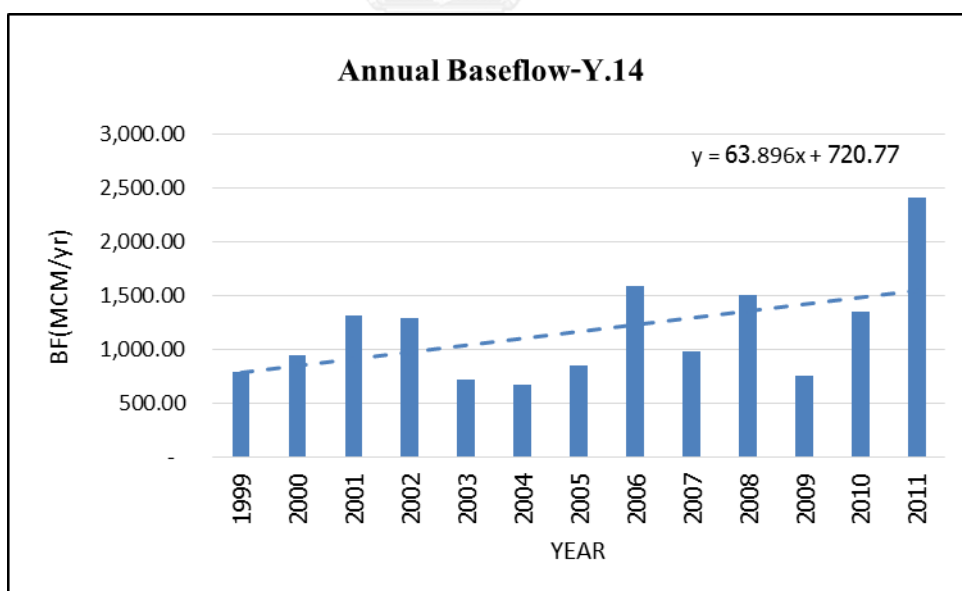
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y3A อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา



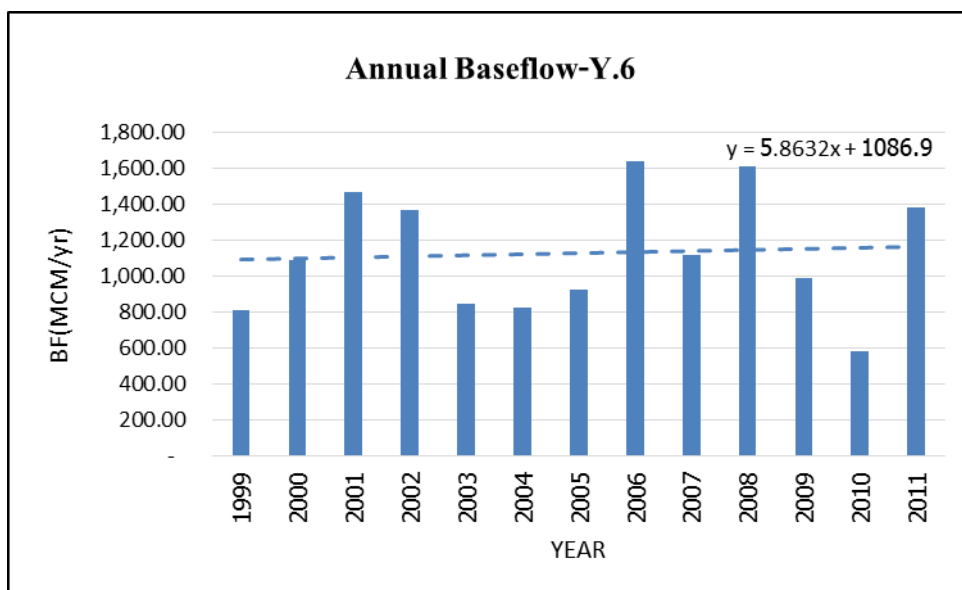
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y20 อำเภอสอง จังหวัดแพร่



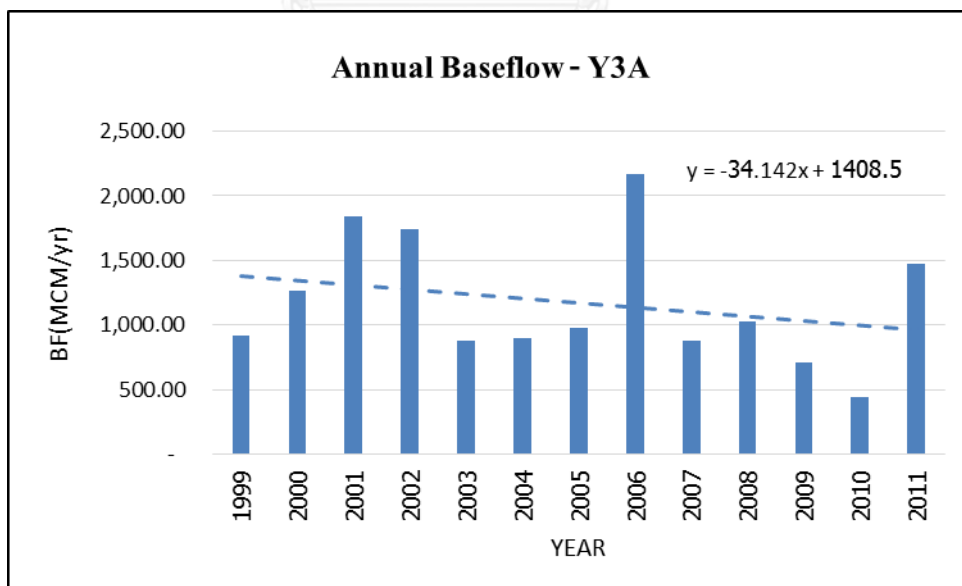
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y1C อำเภอเมือง จังหวัดแพร่



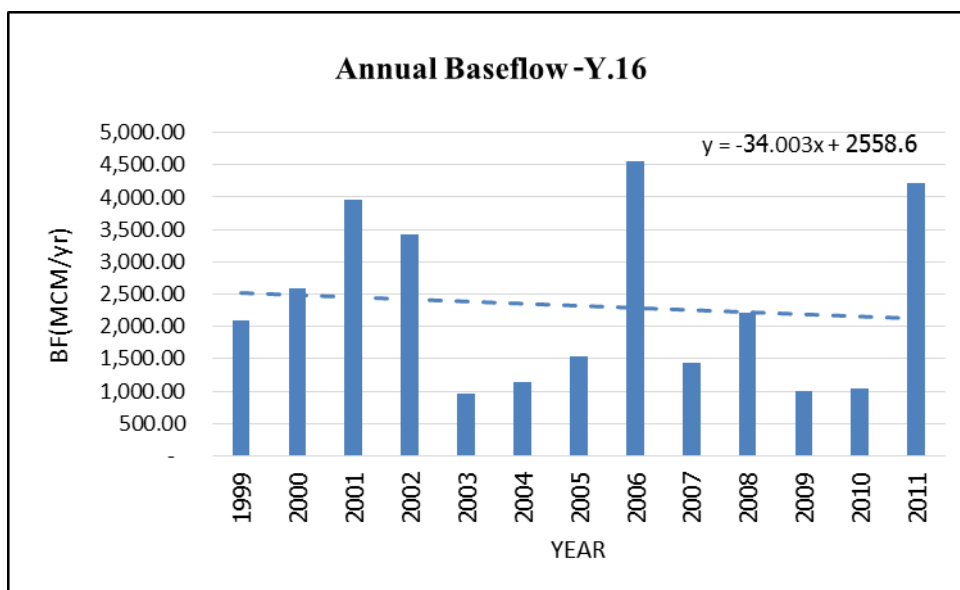
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y14 อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย



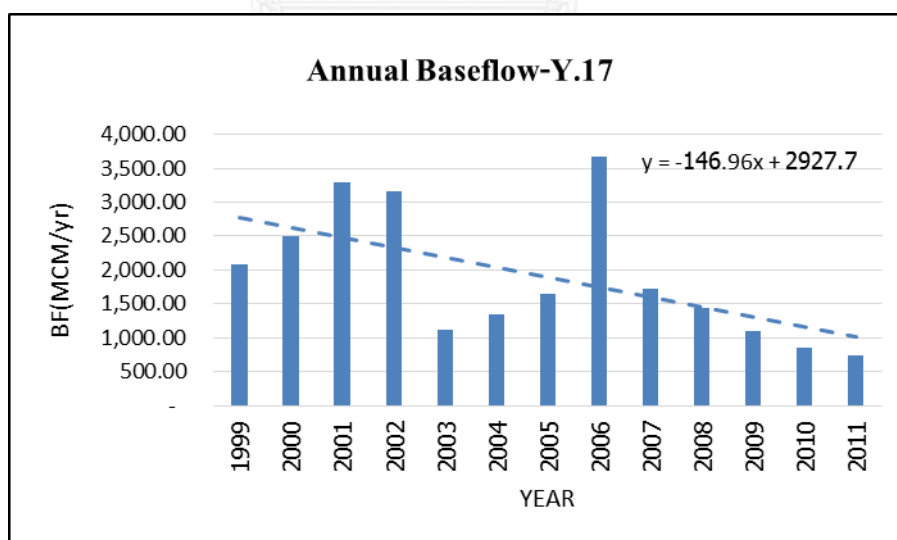
สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y6 อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย



สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y3A อำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย



สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y16 อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก



สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า Y17 อำเภอสามง่าม จังหวัดพิจิตร

รูปที่ 5-19 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการไหลพื้นฐาน

การศึกษาการประเมินดัชนีการไหลพื้นฐาน(Baseflow Index) โดยใช้ทฤษฎี Automated Recressive Digital Filter ในการคำนวณ สรุปดังนี้

1. จากแบบจำลอง SWAT และ MATLAB สามารถให้ค่าดัชนีการไหลพื้นฐาน(Baseflow Index) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

2. จากแบบจำลองพบว่า สถานี Y.17 จังหวัดพิจิตร สถานี Y.14 จังหวัดสุโขทัย และสถานี Y.16 จังหวัดสุโขทัย มีปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) เข้าสู่ลำน้ำ เมื่อเทียบกับสถานีอื่นๆ เมื่อพิจารณารูปน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนมีความสอดคล้องไปทิศทางเดียว แสดงว่าปริมาณน้ำฝนมีผลต่อการไหลของปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow)

3. สถานี Y.1C จังหวัดสุโขทัย มีปริมาณการไหลของน้ำใต้ดินเข้าสู่ลำน้ำน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับสถานีอื่นๆ เมื่อพิจารณารูปน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับสถานีอื่นๆ แสดงให้เห็นว่า ในพื้นที่รับน้ำของ Y.1C มีสภาพเก็บกักน้ำใต้ดินสูง

4. ค่าดัชนีการไหลพื้นฐานของแต่ละสถานีสอดคล้องกับปริมาณการไหลของน้ำใต้ดินเมื่อค่าดัชนีการไหลพื้นฐานสูง แสดงว่าปริมาณการไหลของน้ำใต้ดินในลำน้ำสูงเช่นกัน

5. สถานีที่มีแนวโน้มปริมาณการไหลพื้นฐานเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ Y.14 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึง 63.9 ล้าน ลบ.ม.ต่อปี และสถานีที่มีแนวโน้มปริมาณพื้นฐานลดลงที่สุด คือ Y.17 มีแนวโน้มลดลงถึง 146.96 ล้าน ลบ.ม.ต่อ ปี

6. ในการสร้างชุดฟังก์ชัน M-file บน MATLAB สามารถประยุกต์ใช้งานกับกลุ่มน้ำอื่นได้ โดยพิจารณาที่อัตราการไหล

บทที่ 6

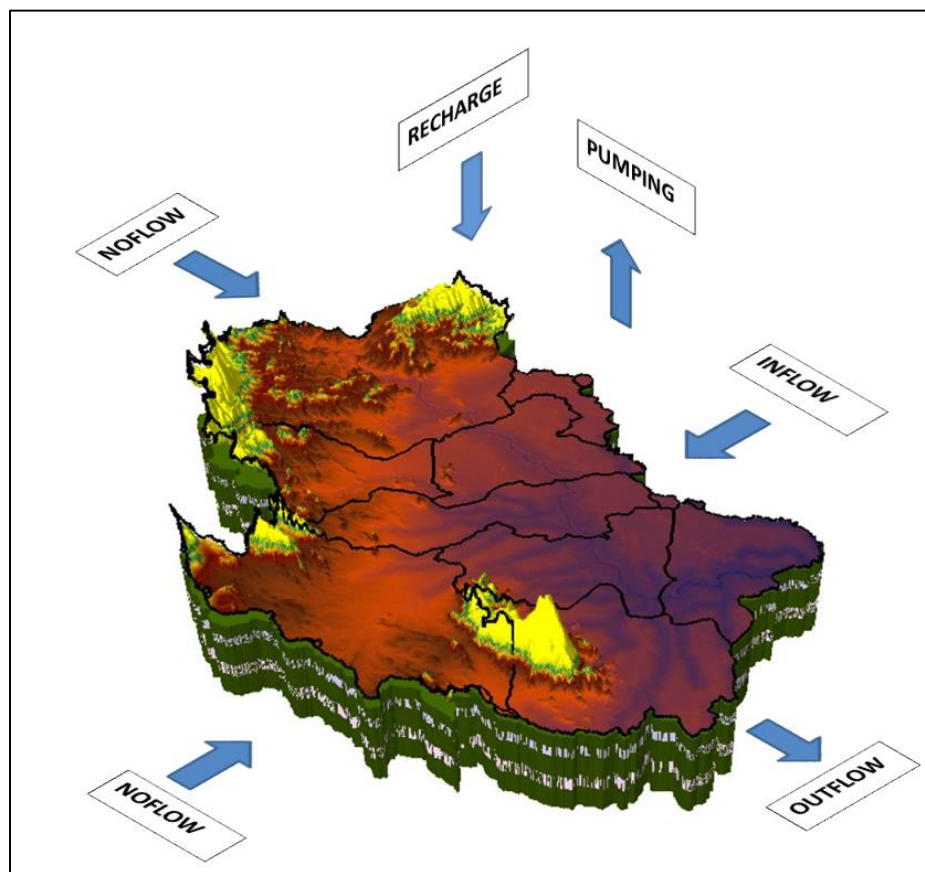
การสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล

ในการศึกษานี้จัดทำแบบจำลองน้ำบาดาล เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของน้ำบาดาล และประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย โดยใช้แบบจำลองน้ำบาดาล (GMS – MODFLOW) ซึ่งในหัวข้อนี้จะอธิบายลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ด้วยแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model) การเปรียบเทียบแบบจำลอง ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำบาดาล และการประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อประเมินศักยภาพน้ำบาดาล

6.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพแอ่งน้ำบาดาลด้วยแบบจำลองเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Model)

แบบจำลองเชิงมโนทัศน์ของแอ่งน้ำบาดาลสุโขทัย ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ มีชั้นหินอุ้มน้ำ 3 ชั้น ประกอบด้วย 1). ตะกอนน้ำพายุยุคปัจจุบันของแม่น้ำยมและน่าน (Recent Flood Plain Deposits, Qfd, หรือชั้นน้ำเจ้าพระยา, Qcp) :ซึ่งเป็น ทรายและกรวด แทรกสลับด้วยชั้นดินเหนียว ชั้นน้ำบาดาลบางพื้นที่ พบตั้งแต่ระดับผิวดินลงไปหรือมีดินเหนียวหนา 5 เมตรปิดทับอยู่ ความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำ 30-35 เมตร ให้น้ำบาดาลประมาณ 15-25 ลบ.ม./ชม. 2). ชั้นน้ำตะกอนตะพักยุคใหม่หรือลานตะพักระดับต่ำ (Low Terrace Deposits, Qlt, หรือชั้นน้ำเชียงราย, Qcr) ประกอบด้วยชั้นดินเหนียว ทรายแป้งที่มีชั้นทรายและกรวดแทรกสลับ ความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำ 10-60 เมตร ให้น้ำบาดาล 15-20 ลบ.ม./ชม. 3). ชั้นตะกอนตะพักน้ำยุคเก่าหรือลานตะพักระดับสูง (High Terrace Deposits, Qht, หรือชั้นน้ำเชียงใหม่, Qcm) เกิดจากการสะสมตัวของกรวด ทราย และเศษหินในพื้นที่ราบสูงเชิงเขา ให้น้ำบาดาล 30-50 ลบ.ม./ชม. ชั้นหินอุ้มน้ำอยู่ที่ระดับ 80-100 ม. จากผิวดิน และพบชั้นหินแข็งบริเวณขอบของพื้นที่ศึกษาด้านทิศเหนือและด้านตะวันออกเฉียงเหนือ แหล่งน้ำบาดาลถูกกักเก็บอยู่ในรอยแตกของหิน ประกอบด้วย หินปูน บางพื้นที่มีหินดินดานและหินทรายแทรกสลับ ให้น้ำบาดาล 2-5 ลบ.ม./ชม. และ หินแปรและหินอัคนี บริเวณที่รอยแตกของหินมีความต่อเนื่องสามารถให้น้ำบาดาล 1-5 ลบ.ม./ชม. และชั้นต่ำสุดกว่านี้ พิจารณาให้ไม่มีการซึมผ่านของน้ำในแนวตั้ง (No Flow Boundary) ส่วนขอบเขตในแนวราบทางด้านทิศต่างๆ พิจารณาให้ไม่มีการซึมผ่านของน้ำในแนวตั้งเช่นกัน เนื่องจากสภาพธรณีของพื้นที่เป็นภูเขาและสันปันน้ำ หรือขอบเขตของกลุ่มน้ำยม ส่วนพื้นผิวดินบนแอ่งพิจารณาให้น้ำสามารถซึมผ่านไปได้ โดยกำหนดให้เป็น

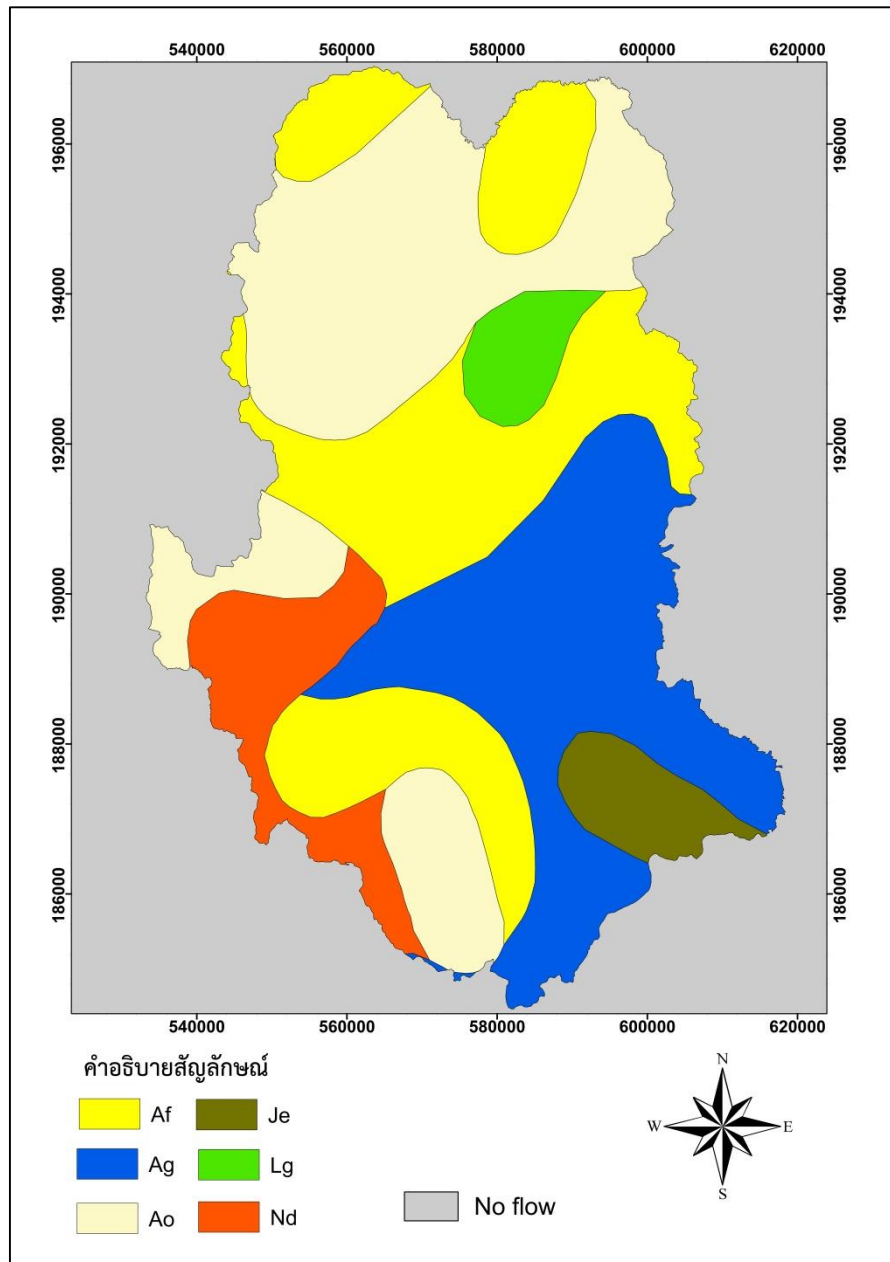
พื้นที่รับน้ำ (Recharge Boundary) ทั้งนี้ในการจำลองระบบอุทกธรณีวิทยาได้ตั้งสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองดังรูปที่ 6-1



รูปที่ 6-1 แบบจำลองเชิงมโนทัศน์แ่งน้ำบาดาลจังหวัดสุโขทัย

การศึกษาแบบจำลองน้ำบาดาลในครั้งนี้ กำหนดการจำลองในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient State Flow) ซึ่งเป็นการจำลองที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง โดยข้อมูลที่นำเข้าแบบจำลองมีรายละเอียดต่อไปนี้

อัตราการเติมน้ำ (Recharge Rate) พิจารณาจากลักษณะทางกายภาพต่างๆในพื้นที่ เช่น ลักษณะของดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน และความสูงต่ำของภูมิประเทศ โดยได้ทำการนำเข้าในแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า เพื่อศึกษาอัตราการเติมน้ำ ซึ่งจะได้พื้นที่เติมน้ำ 6 โชน ตามหน่วยการตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydraulics Respond Units) ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับแผนที่ชุดดิน ดังรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-2 หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยาพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

คุณสมบัติทางอุทกธรณีวิทยาของชั้นน้ำบาดาล ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage coefficient) และความพรุน (Porosity) ซึ่งได้จากการรวบรวมข้อมูลรายงานการศึกษาจัดทำแผนที่น้ำบาดาล มาตรฐาน 1:50,000 จังหวัดสุโขทัย อุตุนิทัศน์ พิชญ์โลก กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ดังแสดงในตาราง 6-1

ตารางที่ 6-1 คุณสมบัติทางอุทกธรณีวิทยาของชั้นน้ำบาดาล

ชั้นน้ำบาดาล (Aquifers)	Hydraulic Conductivity (m/d)		Storage Coefficient	
	Kx,Ky	Kz	Ss	Sy
ชั้นน้ำเจ้าพระยา	4.74	1.185	0.0002	0.2
ชั้นน้ำเชียงราย	8.208	2.052	0.00005	0.002
ชั้นน้ำเชียงใหม่	19.958	4.99	0.000033	0.002

ระดับแรงดันน้ำเริ่มต้น (Initial Head) ระดับน้ำเริ่มต้นที่ใช้ในการจำลองใช้ค่าระดับน้ำเฉลี่ยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555 – 2558 ซึ่งได้จากการข้อมูลระดับน้ำ จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ประมาณ 15 เมตร จากระดับผิวดิน

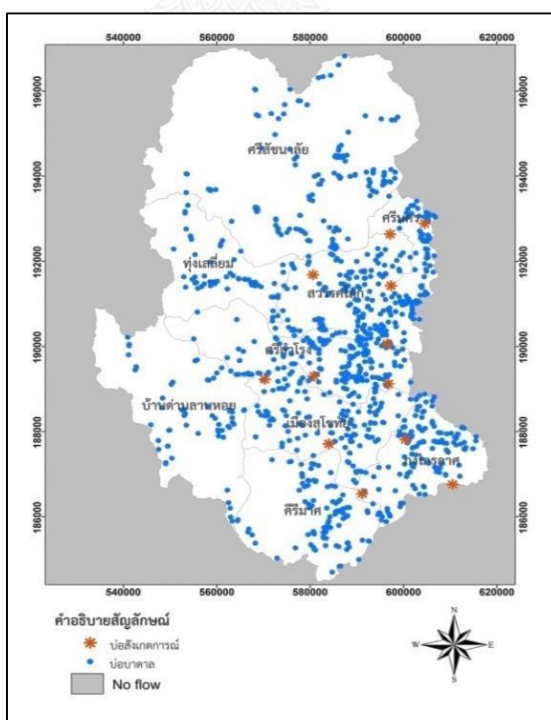
การใช้น้ำบาดาล (Groundwater Usage) การประเมินการใช้น้ำบาดาล โดยการรวบรวมข้อมูลการใช้น้ำบาดาลจากประปาหมู่บ้าน บ่อบาดาลส่วนตัว และบ่อบาดาลของหน่วยงานภาครัฐ จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล โดยแบ่งออกเป็นการใช้น้ำจากกิจกรรมหลักๆ 3 กลุ่มได้แก่ อุปโภค-บริโภค อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม ดังตารางที่ 6-2

ตารางที่ 6-2 การใช้น้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

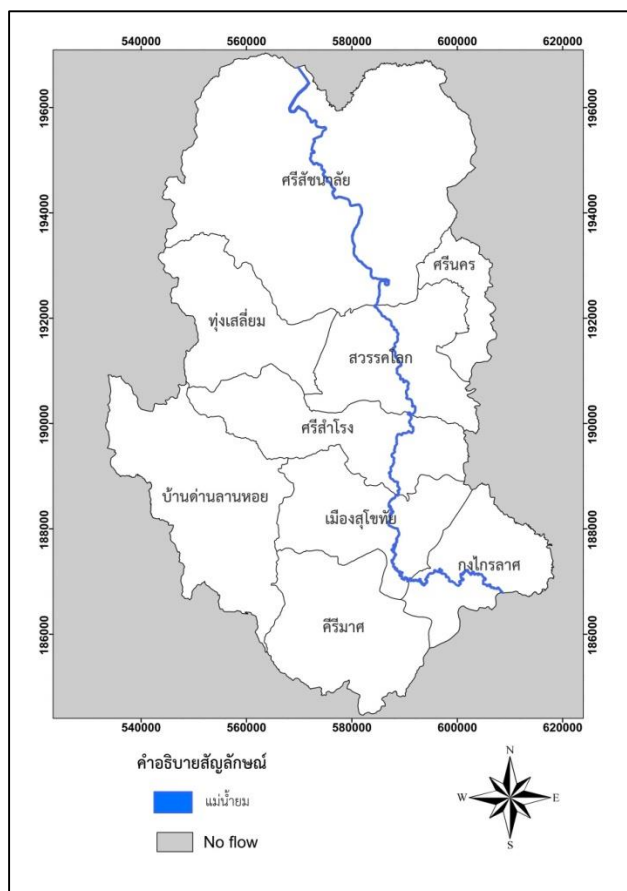
จังหวัด	อำเภอ	การใช้น้ำบาดาล เพื่ออุปโภค-บริโภค (ล้านลบ.ม.ต่อปี)	การใช้น้ำบาดาล เพื่ออุตสาหกรรม (ล้านลบ.ม.ต่อปี)	การใช้น้ำบาดาล เพื่อเกษตรกรรม (ล้านลบ.ม.ต่อปี)
สุโขทัย	กงไกรลาศ	2.196	0.098	29.597
	คีรีมาส	2.078	0.011	29.096
	ทุ่งเสลี่ยม	1.853	0.019	15.351
	บ้านด่านลานหอย	1.558	0	19.823
	เมืองสุโขทัย	5.414	0.422	31.093
	ศรีนคร	0.984	0.08	84.003

จังหวัด	อำเภอ	การใช้น้ำบาดาล เพื่ออุปโภค-บริโภค (ล้านลบ.ม.ต่อปี)	การใช้น้ำบาดาล เพื่ออุตสาหกรรม (ล้านลบ.ม.ต่อปี)	การใช้น้ำบาดาล เพื่อเกษตรกรรม (ล้านลบ.ม.ต่อปี)
	ศรีสัชชนาลัย	3.243	0.008	34.202
	ศรีสำโรง	2.807	0.295	31.221
	สวรรคโลก	3.5	0.112	26.366
	รวม	23.656	9.25	287.27
รวมทั้งหมด		319.69		

จากตาราง 6-2 พบว่า พื้นที่จังหวัดสุโขทัย มีอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยประมาณ 684,460.27 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือ 319.69 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยในแบบจำลองที่ทำการศึกษานี้ นำเข้าตำแหน่งบ่อบาดาลและบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษา และขอบเขตแบบจำลอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6-3 และรูปที่ 6-4 ตามลำดับ

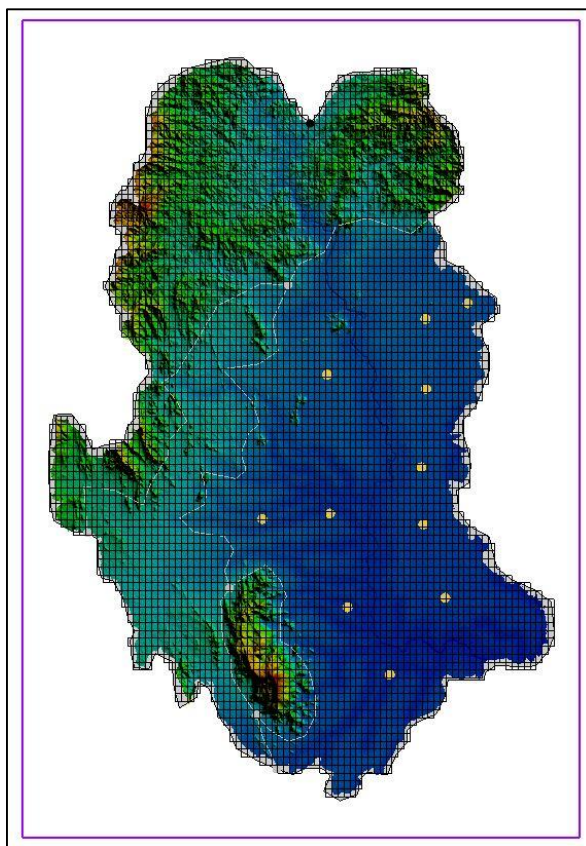


รูปที่ 6-3 บ่อน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย



รูปที่ 6-4 ขอบเขตแบบจำลอง

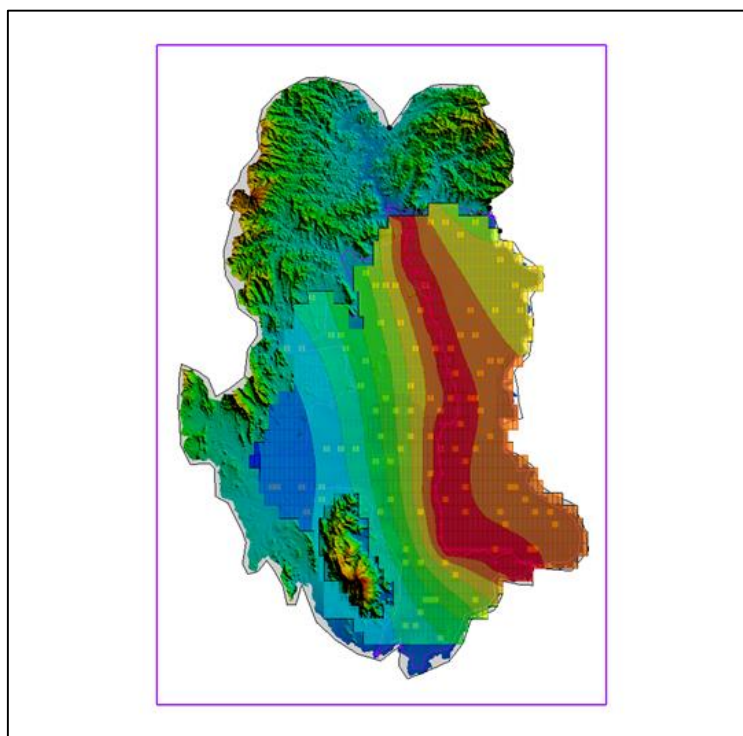
พื้นที่ศึกษาจังหวัดสุโขทัย เพื่อการจำลองทางคณิตศาสตร์ มีขนาด 6,596 ตารางกิโลเมตร มีความกว้าง กิโลเมตร ตามแนวตะวันออก-ตะวันตก จากพิกัด UTM 543000 ถึง 610000 E มีความยาว 67 กิโลเมตร ตามแนวเหนือ-ใต้ จากพิกัด UTM 1971000 ถึง 1840000 N มีความยาว 131 กิโลเมตร และมีความสูงของระดับภูมิประเทศตั้งแต่ 1200 เมตร จนถึง 50 เมตร ในการจำลองได้แบ่งพื้นที่แบบจำลองเป็นกริดขนาดเล็ก โดยแบ่งแนวตะวันออก-ตะวันตก จำนวน 100 สดมภ์ แนวเหนือ-ใต้ จำนวน 200 แถว และแบ่งความสูงเป็น 3 ชั้น รวมทั้งหมด 60,000 กริด ดังรูปที่ 6-5



รูปที่ 6-5 การกำหนดขอบเขตแบบจำลองน้ำบาดาล (GMS-MODFLOW)

6.2 การปรับเทียบและสอบทานแบบจำลอง (Model Calibration and Validation)

การปรับเทียบค่าตัวแปร ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และสัมประสิทธิ์การกักเก็บ ในลักษณะการสุ่มค่าตัวแปร (Trial & Error Adjustment) เพื่อจำลองระดับน้ำบาดาล และเปรียบเทียบกับข้อมูลในสนามว่าสอดคล้องหรือไม่ เมื่อมีการปรับค่าตัวแปรจนแบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่ดีแล้ว ต้องสอบทานแบบจำลองยืนยันอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้ข้อมูลภาคสนามที่แตกต่างจากข้อมูลชุดแรก โดยในการศึกษาครั้งนี้ ได้ตั้งเกณฑ์ความแตกต่างของระดับน้ำบาดาล ด้วยค่าความเบี่ยงเบนคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error, RMSE) ไม่เกินร้อยละ 10 และค่าสัมประสิทธิ์ R^2 มากกว่า 0.60 โดยพิจารณาจากการใช้บ่อสังเกตการณ์จำนวน 12 บ่อ ดังรูปที่ 6-5 เพื่อใช้ในการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลอง พบว่าระดับน้ำมีผลต่างอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ RMSE เฉลี่ย 12 บ่อ เท่ากับร้อยละ 7.518 และมีค่าสัมประสิทธิ์ $R^2 = 0.61$ ถือว่าผลการจำลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังรูปที่ 6-7

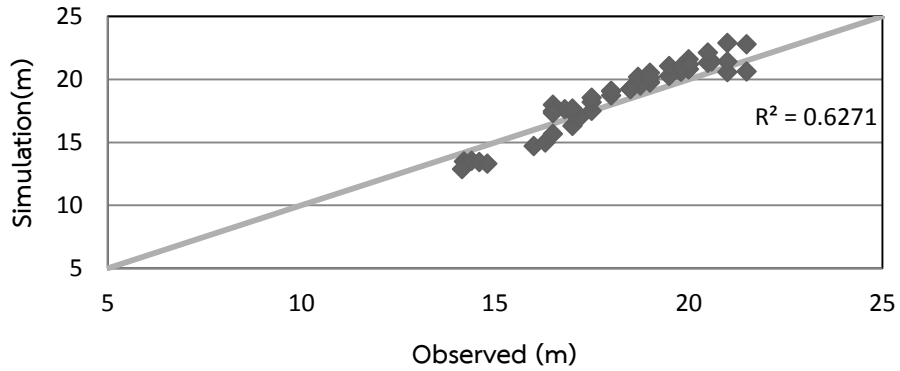


รูปที่ 6-6 ผลการจำลองน้ำบาดาล จังหวัดสุโขทัย

จากการจำลอง แบบจำลอง GMS MODFLOW โดยกำหนดเงื่อนไขแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient State) ช่วงปี พ.ศ. 2554 ถึง 2558 จะเห็นว่าระดับน้ำบาดาลในบริเวณรอบแม่น้ำยม มีลระดับต่ำกว่าบริเวณอื่น ซึ่งเป็นการบ่งบอกนัยๆว่า การใช้น้ำบาดาลในบริเวณดังกล่าว เป็นน้ำบาดาลที่มีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นจากแม่น้ำยม และการศึกษาคั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง โดยใช้บ่อสังเกตการณ์ 12 บ่อ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6-7

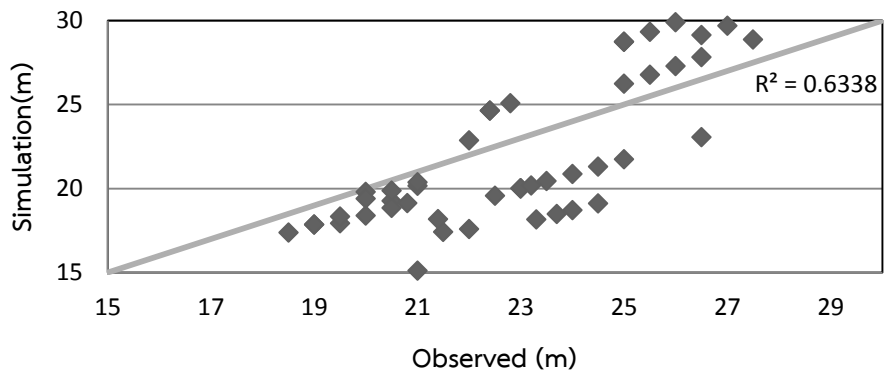
บ่อสังเกตการณ์ NT99

วัดไผ่ตะล่อม ต.คลองยาง อ.สวรรคโลก จ.สุโขทัย

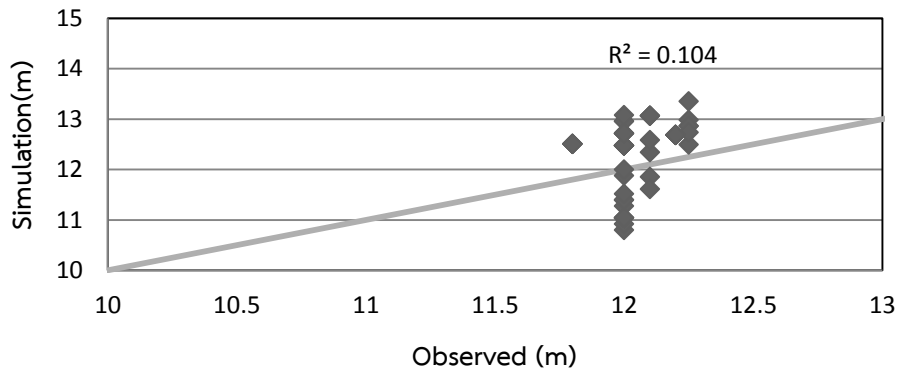


บ่อสังเกตการณ์ NT94

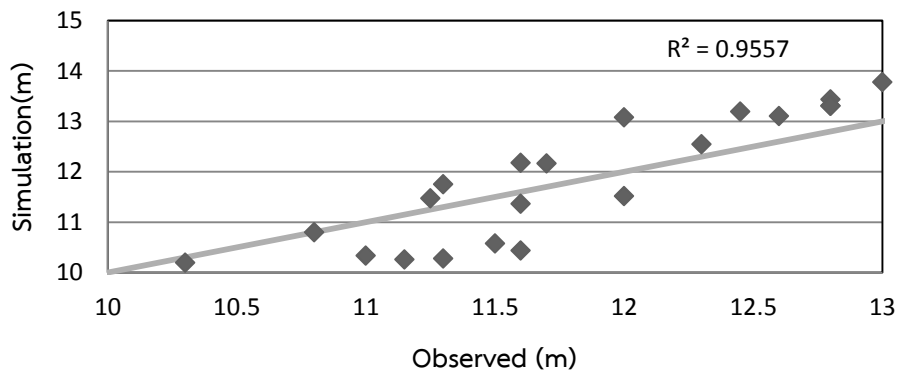
วัดทุ่งมหาชัย ต.คลองมะพลับ อ.ศรีนคร จ.สุโขทัย



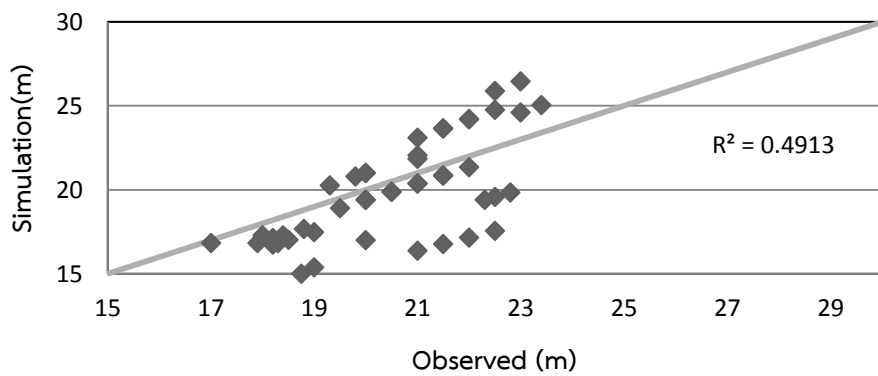
บ่อสังเกตการณ์ NT93
 วัดราววังงาม ต.วังทองแดง อ.เมือง จ.สุโขทัย



บ่อสังเกตการณ์ NT107
 วัดวังศรีไพร ต.คงเคียว อ.กงไกรลาศ จ.สุโขทัย

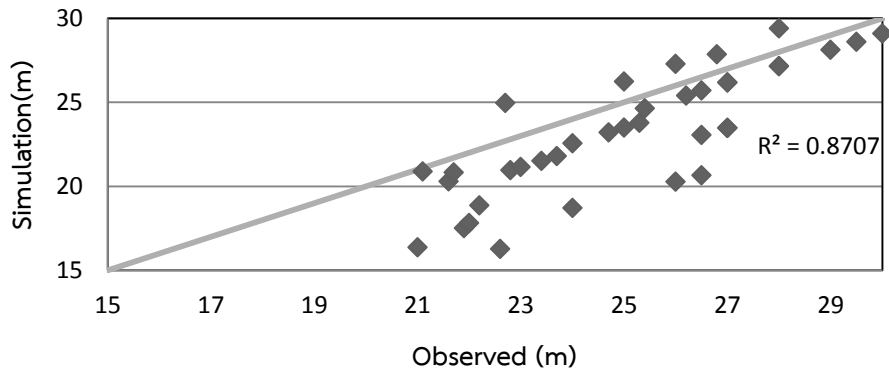


บ่อสังเกตการณ์ NT98
 วัดนิคมศรีสำโรง ต.สามเรือน อ.ศรีสำโรง จ.สุโขทัย



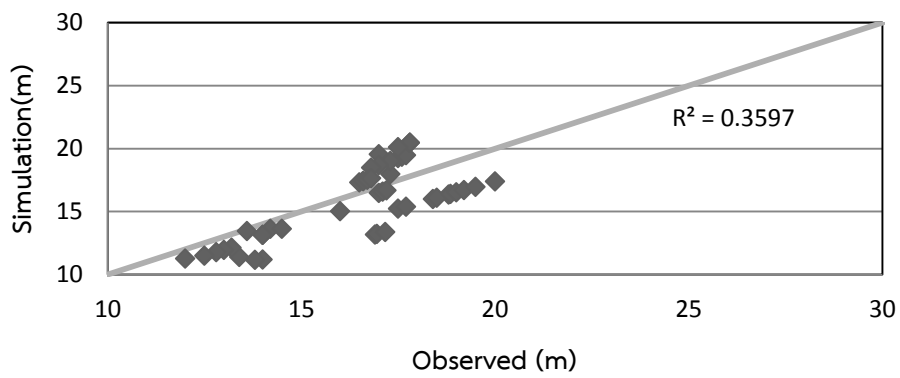
บ่อสังเกตการณ์ NT96

สถานีอนามัยบ้านวงษ์ อ.เกาะตาเลี้ยง อ.ศรีสำโรง จ.สุโขทัย



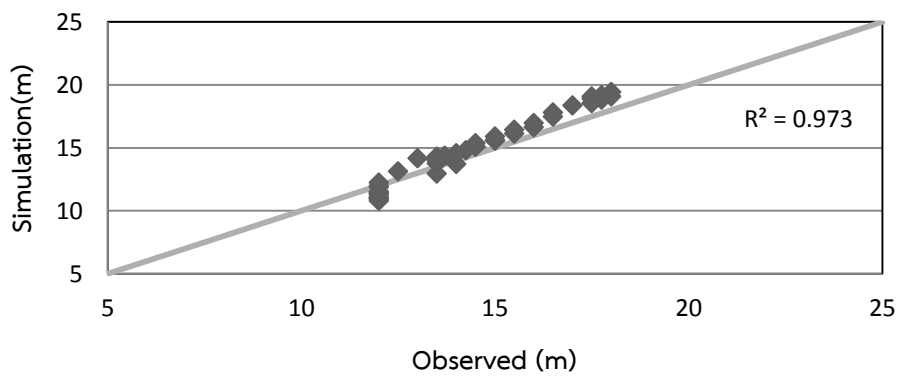
บ่อสังเกตการณ์ NT100

วัดโบสถ์โพธิ์ ต.นาทุ่ง อ.สวรรคโลก จ.สุโขทัย



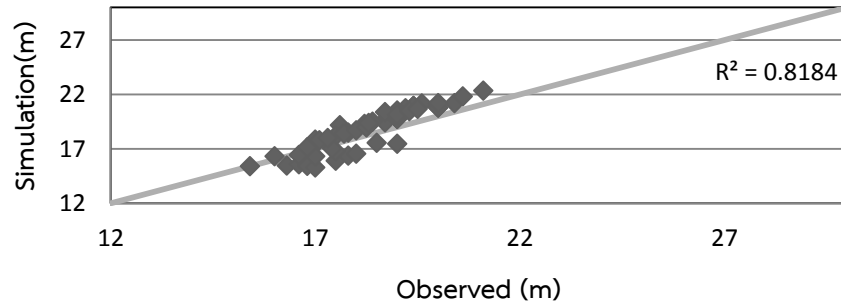
บ่อสังเกตการณ์ NT97

วัดโคกกระทือ ต.วังใหญ่ อ.ศรีสำโรง จ.สุโขทัย



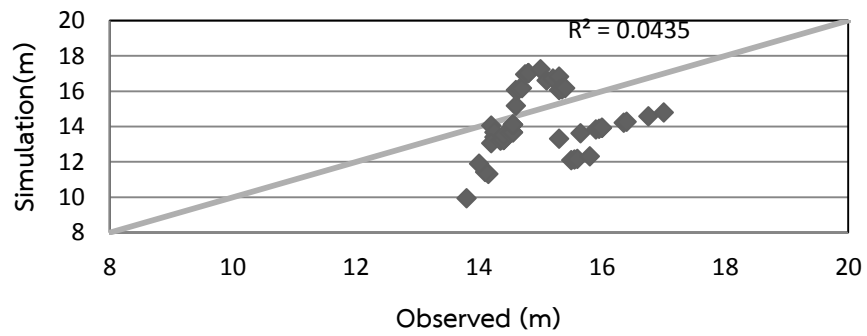
บ่อสังเกตการณ์ NT92

หมู่ 2 ต.บ้านกล้วย อ.เมือง จ.สุโขทัย



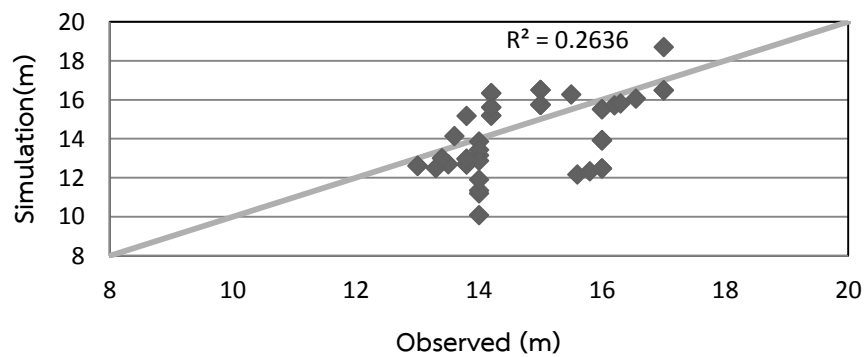
บ่อสังเกตการณ์ NT106

รร.วัดทางตลาด ต.ท่าฉนวน อ.กงไกรลาศ จ.สุโขทัย



บ่อสังเกตการณ์ NT108

สถาบันพลศึกษา ต.บ้านกล้วย อ.เมือง จ.สุโขทัย

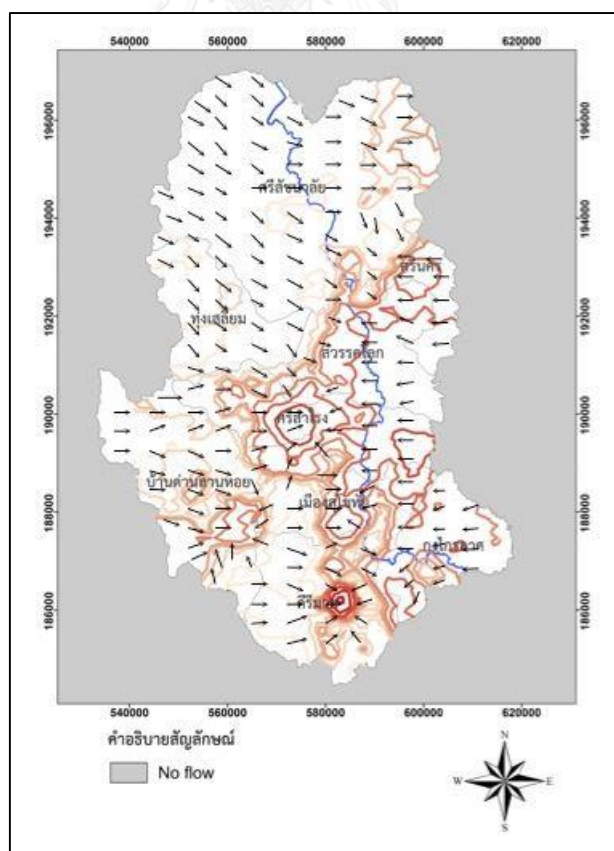


รูปที่ 6-7 เปรียบเทียบระดับน้ำบาดาลที่วัดได้ในสนามกับค่าที่คำนวณจากแบบจำลอง (พ.ศ.2555-2558)

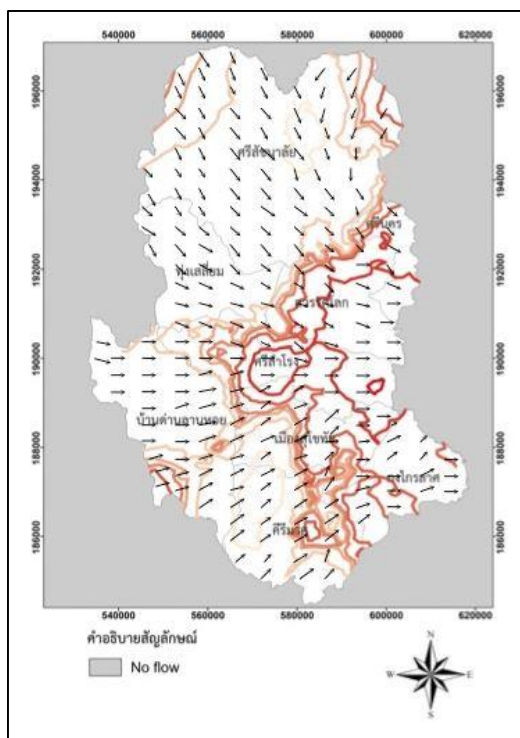
จากการเปรียบเทียบระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ทั้ง 12 บ่อ โดยค่าสัมประสิทธิ์ R^2 มีค่าเท่ากับ 0.61 ผลการจำลองพบว่าในปี พ.ศ. 2557-2558 ระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าในช่วงปีก่อนหน้า เนื่องจากอัตราการเติมลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Grounwater Recharge) ที่นำเข้าแบบจำลอง เป็นค่าเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2543-2556 ทำให้คลาดเคลื่อนมากกว่าปีอื่นๆซึ่งเป็นค่าที่นำเข้าจากแบบจำลอง ArcSWAT โดยตรง

6.3 ทิศทางการไหลของน้ำบาดาล

จากผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย แบบสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าผลการจำลองมีทิศทางการไหลจากพื้นที่เติมน้ำทางทิศตะวันตก แนวสันปันน้ำ อำเภอกงไกรลาศ จะไหลมายังทิศตะวันออก ณ อำเภอกงไกรลาศ รวมกับน้ำจากทิศเหนืออำเภอศรีสัชนาลัย และทิศใต้ อำเภอศรีนคร นอกจากนี้พบว่ามีทิศทางการไหลไปยังบริเวณที่มีการสูบน้ำมาก เกิดเป็นกรวยน้ำลด (Cone of Depression) โดยเฉพาะบริเวณอำเภอศรีสำโรง และอำเภอเมืองสุโขทัย ดังแสดงในรูปที่ 6-8 ถึงรูปที่ 6-10



รูปที่ 6-8 ผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำบาดาล ในชั้นน้ำเจ้าพระยา (Q_{fd})



รูปที่ 6-10 ผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำบาดาล ในชั้นน้ำเชียงใหม่ (Qht)

จากการจำลองอัตราการไหล ในระดับ 81-150 เมตรจากระดับผิวดิน เป็นลักษณะของทราย สลับกับกรวด ซึ่งเป็นชั้นน้ำเชียงใหม่ (Qht) จากการเปรียบเทียบได้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน $K_z = 5.01$ เมตรต่อวัน พบว่า ในช่วงปี พ.ศ. 2554 ถึง 2558 การสูบน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย ไม่มี อิทธิพลของการสูบน้ำในชั้นน้ำนี้ และมีลักษณะการไหลจากด้านทิศเหนือ และด้านทิศตะวันตก ลงสู่ ด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษา ตามลักษณะการไหลของแม่น้ำยม อาจสรุปได้ว่า การสูบน้ำ บาดาลในจังหวัดสุโขทัย เป็นการใช้น้ำบาดาลในระดับตื้น จึงทำให้เกิดการลดระดับของน้ำบาดาลใน ระดับตื้น ในชั้นน้ำเจ้าพระยา (Qfd) และชั้นน้ำเชียงราย (Qlt)

6.4 การประเมินศักยภาพน้ำบาดาล

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในรูปของสมดุลน้ำบาดาล โดยใช้แบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล ในการประเมินปริมาณการสูบน้ำที่เหมาะสมและไม่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำบาดาล โดยกำหนดเกณฑ์ศักยภาพน้ำบาดาล คือ ปริมาณน้ำเติมสู่ระบบต้องมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณน้ำออกจากระบบ

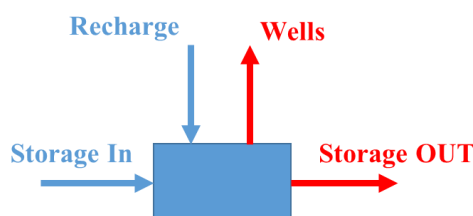
จากแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัย พบว่าลักษณะทางกายภาพปีที่ธรณีวิทยาเป็นระบบปิด หรือสามารถจัดเป็นแอ่งน้ำบาดาลย่อยได้ ทำให้ไม่พบการไหลแบบ Interflow ในชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นจากนอกพื้นที่ศึกษา ดังนั้นปริมาณน้ำที่เข้าสู่ระบบคือ ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในระดับตื้น ซึ่งในการศึกษาคั้งนี้ได้ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลจากผลการจำลอง ArcSWAT และปริมาณน้ำออกจากระบบคือ อัตราการสูบน้ำบาดาลในระดับตื้น เพื่อให้แหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่มีความสมดุล

การศึกษาศักยภาพน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัย โดยแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ สภาวะก่อนกำหนดเงื่อนไข และสภาวะกำหนดเงื่อนไข มีรายละเอียดดังนี้

6.4.1 ผลการศึกษาศักยภาพน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัย : สภาวะจริง

สภาวะก่อนกำหนดเงื่อนไข คือการจำลองน้ำบาดาลในสภาวะจริง โดยใช้แบบจำลอง GMS-MODFLOW เพื่อศึกษาความสมดุลของระบบน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัยในปัจจุบัน ช่วงปี พ.ศ. 2543-2556

ในการศึกษาคั้งนี้ได้กำหนดการเข้า-ออก ของน้ำบาดาล ในแบบจำลองเพื่อหาความสมดุลของระบบบาดาลในพื้นที่ศึกษา โดยเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำเข้าสู่ระบบกับปริมาณน้ำที่ออกจากระบบ ดังรูปที่ 6-11



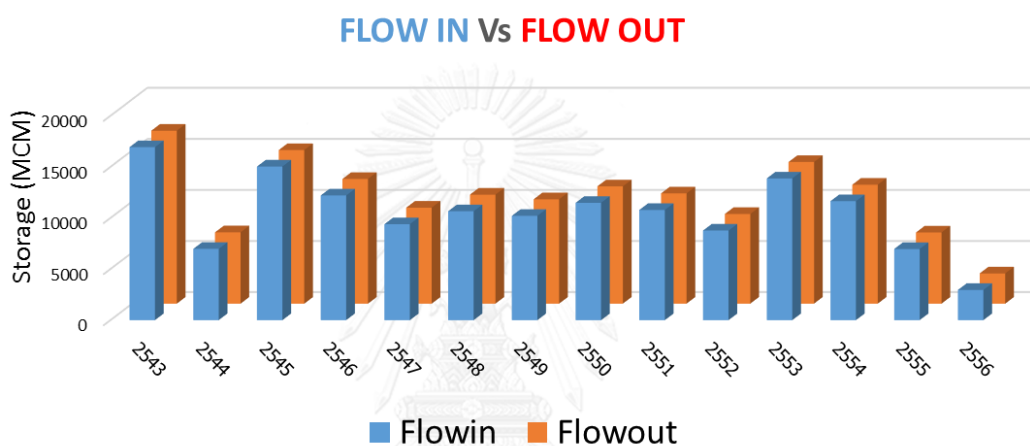
$$\text{Flow In} = \text{Storage In} + \text{Recharge}$$

$$\text{Flow Out} = \text{Storage Out} + \text{Wells}$$

รูปที่ 6-11 การจำลองเชิงโมโนทัศน์ของระบบน้ำบาดาล

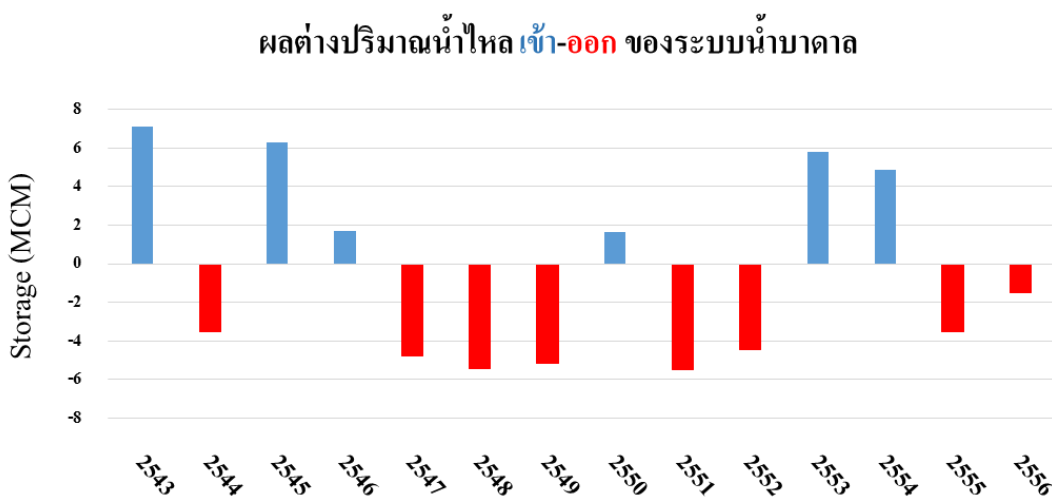
จากรูปที่ 6-11 ปริมาณน้ำที่เข้าสู่ระบบ (Flow In) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่แต่ละกริดเซลล์ในแบบจำลอง ประกอบด้วย ความจุน้ำบาดาลที่ไหลเข้า (Storage In) และปริมาณการเติมน้ำผิวดินลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ปริมาณน้ำที่ออกจากระบบ (Flow Out) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากแต่ละกริดเซลล์ในแบบจำลอง ประกอบด้วย ความจุน้ำบาดาลที่ไหลออก (Storage Out) และปริมาณการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่

ผลของแบบจำลองพบว่า ในสภาวะจริง มีปริมาณน้ำไหลเข้าสู่ระบบน้ำบาดาลน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ไหลออกจากระบบ ดังรูปที่ 6-12



รูปที่ 6-12 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลเข้า-ออก ของระบบน้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2543-2556

จากรูปที่ 6-12 พบว่าปริมาณน้ำไหลเข้า-ออกของระบบน้ำบาดาล มีปริมาณใกล้เคียงกันในแต่ละปี แต่ส่วนใหญ่จะมีปริมาณน้ำไหลเข้าระบบน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ไหลออกจากระบบ แสดงดังรูปที่ 6-13



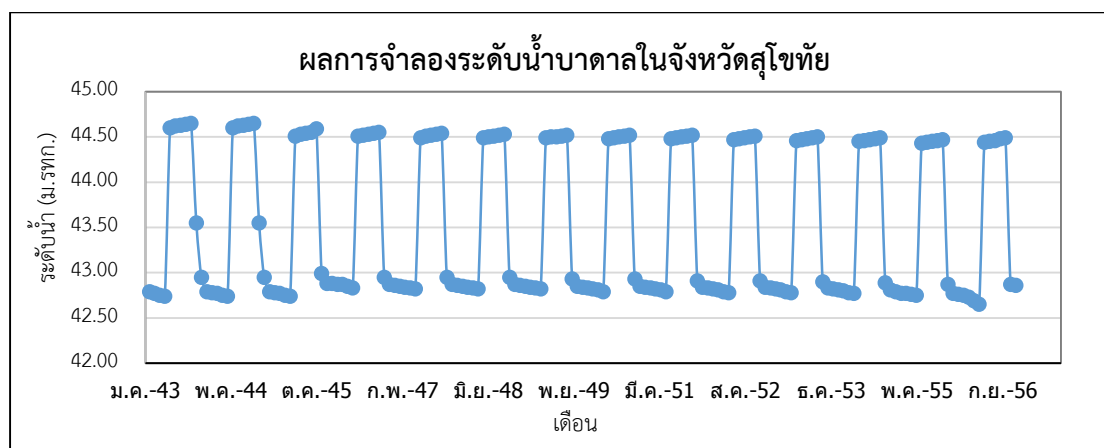
รูปที่ 6-13 ผลต่างของปริมาณน้ำเข้า-ออก ระบบน้ำบาดาล จังหวัดสุโขทัย ปี พ.ศ. 2543-2556

จากการจำลองระบบน้ำบาดาล โดยใช้แบบจำลอง GMS-MODFLOW สามารถศึกษาความสมดุลของระบบน้ำบาดาล โดยใช้เครื่องมือ Flow Budget เพื่อสรุปสถานการณ์จากการจำลองในสภาวะจริง ช่วงปี พ.ศ. 2543-2556 แสดงตารางที่ 6-3

ตารางที่ 6-3 ผลการศึกษาความสมดุลของระบบน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัยในสภาวะจริง ปี พ.ศ. 2543-2556

	FLOW IN (MCM)	FLOW OUT (MCM)
STORAGE	6,816.265	7,515.987
GENERAL HEAD	2,126.338	2,560.103
WELLS	0	319.691
RIVER LEAKAGE	973.797	408.233
RECHARGE	882.048	0
TOTAL FLOW	10,798.448	10,804.014
IN-OUT		-5.564

จากตารางที่ 6-3 พบว่าระบบน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย มีปริมาตรการเติมน้ำผิวดินลงสู่ชั้นน้ำบาดาล 882.05 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งเป็นผลจากแบบจำลอง SWAT และใช้เป็นข้อมูลน้ำเข้าสู่แบบจำลองน้ำบาดาล GMS MODFLOW และผลการจำลองพบว่า ระบบน้ำบาดาลระดับต้นมีปริมาณน้ำเข้าสู่ระบบน้อยกว่าปริมาณน้ำออกเฉลี่ยปีละ 5.564 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี พบว่าระบบน้ำบาดาลเกินสมดุล และมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล 2.05 เมตร ในช่วงที่มีการใช้น้ำของแต่ละปี ดังรูปที่ 6-11 ดังนั้นจึงต้องลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลให้น้อยลง โดยการกำหนดเงื่อนไขการสูบน้ำตามหัวข้อที่ 6.4.2



รูปที่ 6-14 ผลการจำลองระดับน้ำบาดาล

6.4.2 ผลการศึกษาศักยภาพน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัย : สภาวะกำหนดเงื่อนไข

สภาวะกำหนดเงื่อนไข คือการจำลองน้ำบาดาล โดยใช้แบบจำลอง GMS-MODFLOW ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ใช้วิธี Trial & Error ปริมาณการสูบน้ำบาดาลปลอดภัย เพื่อประเมินศักยภาพของน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัยให้มีความสมดุล แสดงดังตารางที่ 6-4

ตารางที่ 6-4 ผลการศึกษาความสมดุลของระบบน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัยในสภาวะกำหนดเงื่อนไข ปี พ.ศ. 2543-2556

	FLOW IN (MCM)	FLOW OUT (MCM)
STORAGE	6,816.265	7,123.748
GENERAL HEAD	2,126.338	2,665.997
WELLS	0	287.376
RIVER LEAKAGE	973.797	721.258
RECHARGE	882.048	0
TOTAL FLOW	10,798.448	10,798.789
IN-OUT		0.068

จากตารางที่ 6-4 พบว่าระบบน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย สุโขทัย มีปริมาณการเติมน้ำผิวดินลงสู่ชั้นน้ำบาดาล 882.05 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งเป็นผลจากแบบจำลอง SWAT และใช้เป็นข้อมูลน้ำเข้าสู่แบบจำลองน้ำบาดาล GMS MODFLOW และผลการจำลองหลังจากกำหนดปริมาณการสูบน้ำบาดาลพบว่า ระบบน้ำบาดาลระดับต้นมีปริมาณน้ำเข้าสู่ระบบมากกว่าปริมาณน้ำออกเฉลี่ยปีละ 0.068 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่งผลให้ระบบน้ำบาดาลสมดุล ทำให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นปีละ 0.21 เมตร/ปี ดังนั้นปริมาณการสูบน้ำบาดาลปลอดภัย ควรสูบน้ำไม่เกิน 287.376 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย โดยใช้แบบจำลองควบน้ำผิวดิน-น้ำบาดาล จากผลการศึกษาข้างต้นสรุปว่า ปริมาณน้ำบาดาลเก็บกักในพื้นที่สุโขทัยมีค่าเท่ากับ 10,798.44 ล้านลูกบาศก์เมตร และปริมาณการสูบปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 287.376 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย

1. การศึกษาความเชื่อมโยงทางชลศาสตร์ระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดินในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย
2. การสร้างแบบจำลองประเมินปริมาณน้ำผิวดินที่เติมลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่ลุ่มน้ำยม
3. การสร้างแบบจำลองน้ำบาดาล เพื่อจำลองระดับน้ำ ลักษณะการไหลของน้ำบาดาล และประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

โดยสรุปผลได้ดังนี้

7.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

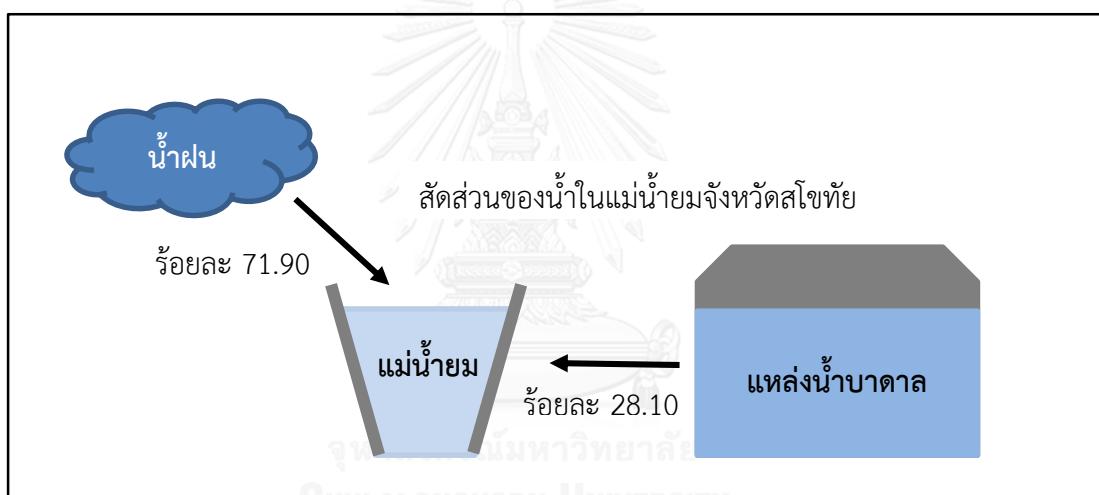
การศึกษาความเชื่อมโยงทางชลศาสตร์ระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย โดยใช้ Stable Isotope Hydrology (δD และ $\delta^{18}O$) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง (δD และ $\delta^{18}O$) ของน้ำฝน มีความสัมพันธ์เชิงเส้นเท่ากับ $\delta D = 8.12\delta^{18}O + 7.02$

องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของน้ำท่า จากการวิเคราะห์ข้อมูลปี พ.ศ. 2556 ถึง 2558 พบว่าในปี พ.ศ. 2557 มีกระบวนการระเหยของน้ำผิวดินมากกว่าปีอื่นๆ สามารถคาดการณ์ได้ว่า ในช่วงเวลาดังกล่าว น้ำในแม่น้ำยมบริเวณจังหวัดสุโขทัยเกิดจากน้ำผิวดินที่ไหลมาจากด้านเหนือน้ำ หรือน้ำที่ถูกปล่อยจากแหล่งน้ำอื่น ฝาย หรืออ่างเก็บน้ำ เป็นต้น เมื่อพิจารณาองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของแม่น้ำยม ในพื้นที่อำเภอสวรรคโลก พบว่ามีค่าสูงกว่า (Enriched) อำเภอเมืองสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย และคล้ายคลึงกับสัดส่วนไอโซโทปเสถียรของน้ำบาดาล กล่าวคือ องค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของแม่น้ำยม อำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย มีส่วนประกอบของน้ำบาดาลและน้ำผิวดินที่ไหลจากทางด้านเหนือน้ำในช่วงฤดูแล้ง

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรระหว่างน้ำบาดาลและน้ำฝนในช่วงฤดูแล้ง พบว่าค่า δD และ $\delta^{18}O$ ของน้ำบาดาลมีค่าต่ำกว่าน้ำฝน แต่คล้ายคลึงกับสัดส่วนไอโซโทปเสถียรของ

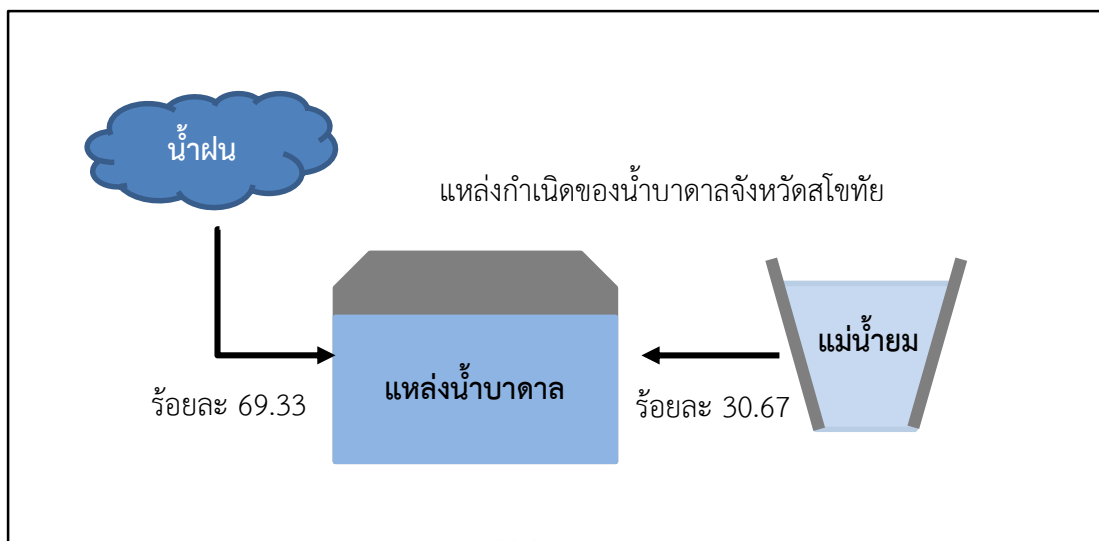
น้ำฝนในฤดูฝน สรุปได้ว่า น้ำบาดาลในช่วงฤดูแล้งมีแหล่งกำเนิดจากน้ำฝนนอกพื้นที่ หรือจากฝนที่ตกในพื้นที่ในช่วงฤดูฝนที่ผ่านมา อนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรระหว่างน้ำบาดาลและแม่น้ำยม ณ สถานีสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย พบว่า ค่า δD และ $\delta^{18}O$ อยู่ในช่วงเดียวกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่าในบริเวณดังกล่าว มีการเชื่อมโยงทางศาสตร์ของแหล่งน้ำทั้ง 2 แหล่ง ระหว่างน้ำผิวดินและน้ำบาดาล ดังนั้น แม่น้ำยม ณ สถานีสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย มีการน้ำบาดาลไหลออกสู่มแม่น้ำในรูปแบบอัตราการไหลพื้นฐาน (Base Flow)

การวิเคราะห์สมดุลมวลไอโซโทปเสถียร (Isotope Mass Balance) พบว่า แม่น้ำยม ณ สถานีสวรรคโลก มีอัตราการไหลออกของน้ำบาดาลลงสู่มน้ำยมประมาณร้อยละ 28.1 ของอัตราการไหลในลำน้ำ ดังรูปที่ 7-1



รูปที่ 7-1 สัดส่วนของน้ำในแม่น้ำยมจังหวัดสุโขทัย

การวิเคราะห์สมดุลมวลอุทกวิทยาไอโซโทปเสถียร เพื่อหาแหล่งกำเนิดของน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย จากข้อมูลที่เก็บตัวอย่างในปี พ.ศ. 2550 พ.ศ. 2555 และ พ.ศ. 2559 สรุปได้ว่า น้ำบาดาล มีแหล่งกำเนิดจากน้ำฝนร้อยละ 69.33 และน้ำผิวดินร้อยละ 30.67 ดังรูปที่ 7-2



รูปที่ 7-2 สัดส่วนของน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยแบ่งเป็น 2 ฤดูกาล คือ ฤดูฝน และฤดูแล้ง โดยใช้ค่าดิวทีเรียมส่วนเกิน (Deuterium Excess) จากแหล่งต่างๆ แทนค่าในสมการ พบว่า ปริมาณน้ำบาดาล มีปริมาณการเติมในช่วงฤดูฝนร้อยละ 71.4 และช่วงฤดูแล้งร้อยละ 28.6 ทั้งนี้ ผลการศึกษาสัดส่วนการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับต้น เมื่อเปรียบเทียบผลจากการศึกษาจากองค์ประกอบไอโซโทปเสถียร และผลจากการศึกษาจากแบบจำลอง SWAT พบว่าสัดส่วนการเติมน้ำในฤดูฝนและฤดูแล้งของทั้งสองแบบจำลองแตกต่างกัน เนื่องจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร เป็นผลที่ได้จากการคำนวณของตัวอย่างน้ำที่ทำการเก็บตัวอย่าง ณ วันหนึ่งในฤดูฝนและฤดูแล้งเท่านั้น ทำให้ผลที่ได้มีความแตกต่างจากแบบจำลอง SWAT ที่มีการจำลองในรูปแบบรายวันและรายเดือนตลอดทั้งสองฤดู ดังตารางที่ 7-1

ตารางที่ 7-1 การเปรียบเทียบผลการศึกษาปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล

เครื่องมือการศึกษา	ร้อยละปริมาณการเติมในฤดูฝน	ร้อยละปริมาณการเติมในฤดูแล้ง
เทคนิคไอโซโทปเสถียร	71.4	28.6
แบบจำลอง SWAT	84.2	15.79

7.1.2 สรุปผลการศึกษาจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (SWAT) ในพื้นที่ลุ่มน้ำยม

การศึกษาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (ArcSWAT) เพื่อประเมินความสัมพันธ์ของน้ำผิวดินและปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่สุโขทัย จากการสร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ได้หาความสมบูรณ์ของแบบจำลองโดยใช้ค่า R^2 และค่า NSE ของปริมาณน้ำท่ารายเดือน โดยใช้สถานีตรวจวัดน้ำ 2 สถานี ได้แก่ สถานี Y.31 และ สถานี Y.14 โดยมีรายละเอียดดังนี้

การปรับเทียบ (Calibration) ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.31 อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา มีค่าเท่ากับ 0.705 และ 0.649 ตามลำดับ ส่วนค่า R^2 และค่า NSE ของปริมาณน้ำท่ารายเดือนจากการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Validation) ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.31 ในช่วงมกราคม พ.ศ. 2543 - เดือนธันวาคม พ.ศ. 2546 เท่ากับ 0.628 และ 0.599 ตามลำดับ และการตรวจพิสูจน์ (Validation) ในช่วงมกราคม พ.ศ. 2552 - เดือนธันวาคม พ.ศ. 2556 เท่ากับ 0.695 และ 0.511 ตามลำดับ

การปรับเทียบแบบจำลอง (Calibration) โดยใช้ปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.14 อำเภอศรีสัชชนาลัย จังหวัดสุโขทัย มีค่า R^2 และค่า NSE เท่ากับ 0.716 และ 0.673 ตามลำดับ ส่วนค่า R^2 และค่า NSE ของปริมาณน้ำท่ารายเดือนจากการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Validation) ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.14 ในช่วงมกราคม พ.ศ. 2543 - เดือนธันวาคม พ.ศ. 2546 เท่ากับ 0.638 และ 0.622 ตามลำดับ และการตรวจพิสูจน์ (Validation) ในช่วงมกราคม พ.ศ. 2552 - เดือนธันวาคม พ.ศ. 2556 เท่ากับ 0.77 และ 0.695 ตามลำดับ จากการปรับเทียบแบบจำลอง ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่าดังกล่าวข้างต้น พบว่าแบบจำลองสามารถประยุกต์กับพื้นที่ลุ่มน้ำยมได้ดี

การประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อหาปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย พบว่าปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลรายปีเฉลี่ยช่วงปี พ.ศ. 2543-2556 มีค่าเท่ากับ 133.7 มิลลิเมตรต่อปี หรือ 882.05 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และปี พ.ศ. 2545 มีปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 209.5 มิลลิเมตรต่อปี หรือ 1,381.98 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และปี พ.ศ. 2556 มีปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 36.6 มิลลิเมตรต่อปี หรือ 241.54 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ที่ได้จากแบบจำลอง SWAT ในช่วงปีพุทธศักราช 2543 ถึงปีพุทธศักราช 2556 ณ สถานี Y.14 มีปริมาณการไหลพื้นฐานตลอดทั้งปีและยังคงมีปริมาณการไหลพื้นฐานออกสู่แม่น้ำยมในช่วงฤดูแล้ง โดยมีปริมาณการไหลพื้นฐานเฉลี่ย (Average Baseflow) เท่ากับ 35.84 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที คิดเป็นร้อยละ 34.1 ของการไหลในแม่น้ำทั้งหมด ซึ่งแตกต่างจากสถานี Y.4 ที่มีปริมาณการไหลพื้นฐานค่อนข้างน้อย สอดคล้องกับการ

วิเคราะห์ด้วยองค์ประกอบไฮโดรโพลีเสถียร และสภาพลำน้ำที่เกิดขึ้นจริงที่สังเกตการณ์ในช่วงออกสำรวจภาคสนาม โดยมีปริมาณการไหลพื้นฐานเฉลี่ย (Baseflow) เท่ากับ 23.97 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที คิดเป็นร้อยละ 32.4 ของการไหลในแม่น้ำทั้งหมด

ทั้งนี้ ได้ทำการการศึกษาการประเมินดัชนีการไหลพื้นฐาน (Baseflow Index) โดยใช้ทฤษฎี Automated Recressive Digital Filter ในการคำนวณหาปริมาณการไหลพื้นฐานในลำน้ำ ณ สถานีตรวจวัดน้ำท่าในแม่น้ำยม จำนวน 9 สถานี พบว่า 1) จากแบบจำลอง SWAT และ MATLAB สามารถให้ค่าดัชนีการไหลพื้นฐาน (Baseflow Index) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน 2) จากแบบจำลองพบว่า สถานี Y.17 จังหวัดพิจิตร สถานี Y.14 จังหวัดสุโขทัย และสถานี Y.16 จังหวัดสุโขทัย มีปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) เข้าสู่ลำน้ำสูงสุดเมื่อเทียบกับสถานีอื่นๆ ความสอดคล้องกับปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่ แสดงว่าปริมาณน้ำฝนมีผลต่อการไหลของปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) 3) สถานี Y.1C จังหวัดสุโขทัย มีปริมาณการไหลของน้ำใต้ดินเข้าสู่ลำน้ำน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับสถานีอื่นๆ เมื่อพิจารณาปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับสถานีอื่นๆ แสดงให้เห็นว่า ในพื้นที่รับน้ำของ Y.1C มีสภาพเก็บกักน้ำใต้ดินสูง 4) ค่าดัชนีการไหลพื้นฐานของแต่ละสถานีสอดคล้องกับปริมาณการไหลของน้ำใต้ดินเมื่อค่าดัชนีการไหลพื้นฐานสูง แสดงว่าปริมาณการไหลของน้ำใต้ดินสูงลำน้ำสูงเช่นกัน 5) สถานีที่มีแนวโน้มปริมาณน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ Y.14 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึง 63.9 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และสถานีที่มีแนวโน้มปริมาณน้ำใต้ดินลดลงที่สุด คือ Y.17 มีแนวโน้มลดลงถึง 146.96 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี 6) ในการสร้างชุดฟังก์ชัน M-file บน MATLAB สามารถประยุกต์ใช้งานกับลุ่มน้ำอื่นได้

7.1.3 สรุปผลการศึกษาจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองการไหลของน้ำบาดาลในสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยปรับเทียบพารามิเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินอุ้มน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้บ่อสังเกตการณ์จำนวน 12 บ่อ เพื่อใช้ปรับเทียบแบบจำลองจากการปรับเทียบแบบจำลองพบว่า ระดับน้ำจากแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 7.518 เมื่อเทียบกับระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ ถือว่าแบบจำลองมีความแม่นยำปานกลางสามารถยอมรับได้

ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง GMS-MODFLOW เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย พบว่าน้ำบาดาลในเขตจังหวัดสุโขทัย มีทิศทางการไหลจากพื้นที่เติมน้ำทางทิศตะวันตก แนวสันปันน้ำ อำเภอกงสุ่ยเสียม จะไหลมายังทิศตะวันออก ณ อำเภอกงไกรลาศ รวมกับน้ำ

จากทิศเหนือ อำเภอศรีสัชชนาลัย และไหลลงสู่ทิศตะวันออกเฉียงใต้ อำเภอศรีนคร ตามแนวทิศทางการไหลของแม่น้ำยม

การไหลในชั้นน้ำบาดาลเจ้าพระยา (Qfd) ซึ่งเป็นชั้นน้ำบาดาลในระดับตื้น มีทิศทางการไหลไปยังบริเวณที่มีการสูบน้ำมาก เกิดเป็นกรวยน้ำลด (Cone of Depression) ที่มีอิทธิพลจากการสูบน้ำบาดาลในชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นจำนวนมาก โดยเฉพาะบริเวณอำเภอศรีสำโรง และอำเภอเมืองสุโขทัย

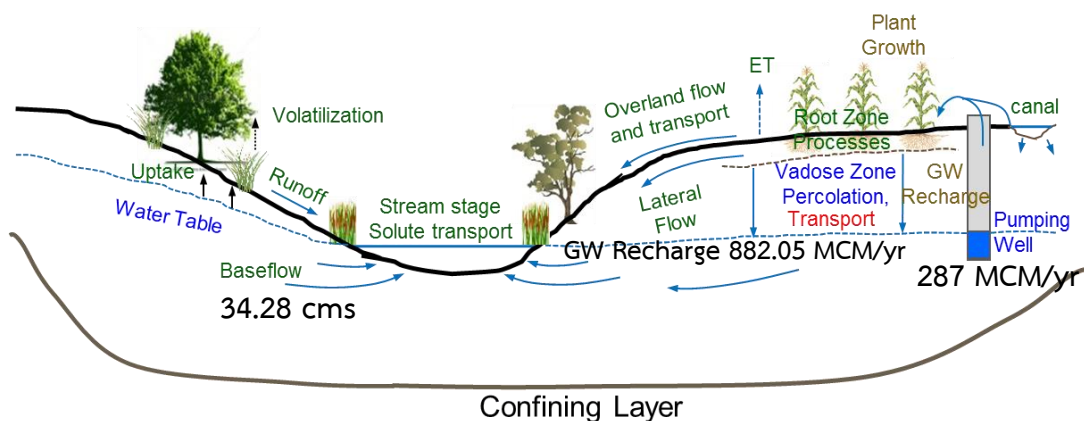
จากแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาลพื้นที่จังหวัดสุโขทัย พบว่าลักษณะทางกายภาพธรณีวิทยาเป็นระบบปิด หรือมีลักษณะทางกายภาพจัดเป็นแอ่งน้ำบาดาลย่อยได้ ซึ่งสามารถนิยามได้ว่าเป็น “แอ่งสุโขทัย”

ในการศึกษาครั้งนี้ประเมินศักยภาพน้ำบาดาลโดยใช้หลักสมดุลน้ำ โดยกำหนดปริมาณน้ำที่เข้าสู่ระบบ คือปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล และปริมาณน้ำออกจากระบบ คืออัตราการสูบน้ำบาดาล ดังนั้นในการประเมินศักยภาพน้ำบาดาล จึงกำหนดเกณฑ์ศักยภาพน้ำบาดาล ตามปริมาณการเก็บกักหรือปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลโดยธรรมชาติ โดยแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ 1) สภาวะก่อนกำหนดเงื่อนไข 2) สภาวะกำหนดเงื่อนไข สรุปผลดังนี้

ผลการจำลองระบบน้ำบาดาลจังหวัดสุโขทัยในสภาวะปกติ พบว่าระบบน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัย มีปริมาณน้ำเข้าสู่ระบบน้อยกว่าปริมาณน้ำออกเฉลี่ยปีละ 5.564 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่งผลให้ระบบน้ำบาดาลเกินสมดุล และมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลปีละ 2.05 เมตร ในช่วงที่มีการใช้น้ำ ทำให้เกินความสามารถในการสูบน้ำของปั๊มหอยโข่ง ดังนั้นจึงต้องลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลให้น้อยลง โดยการกำหนดเงื่อนไขการสูบน้ำบาดาล

ผลการจำลองระบบน้ำบาดาลจังหวัดสุโขทัย ซึ่งกำหนดเงื่อนไขการสูบน้ำบาดาลด้วยวิธี Trial&Error เพื่อให้ระบบน้ำบาดาลมีความสมดุล พบว่าเมื่อกำหนดปริมาณการสูบน้ำบาดาล 287.376 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ระบบน้ำบาดาลในจังหวัดสุโขทัยมีปริมาณน้ำเข้าสู่ระบบมากกว่าปริมาณน้ำออกเฉลี่ยปีละ 0.068 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ส่งผลให้ระบบน้ำบาดาลสมดุล และทำให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นปีละ 0.21 เมตร/ปี

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย โดยใช้แบบจำลองควบน้ำผิวดิน-น้ำบาดาล จากผลการศึกษาข้างต้นสรุปได้ว่า ปริมาณน้ำบาดาลเก็บกักในพื้นที่สุโขทัยมีค่าเท่ากับ 10,798.44 ล้านลูกบาศก์เมตร และปริมาณการสูบตลอดภัยมีค่าเท่ากับ 287.376 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ดังรูปที่ 7-3



รูปที่ 7-3 สรุปผลการศึกษา

7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ มีการศึกษาในหลายส่วนและพื้นที่ศึกษามีขนาดใหญ่ รวมถึงระยะเวลาและค่าใช้จ่ายที่มีจำกัด การรวบรวมข้อมูลในพื้นที่ศึกษาจึงอาจไม่เพียงพอมากนัก ดังนั้น ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองจึงมีเพียงระดับหนึ่งตามข้อจำกัดของข้อมูล

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบไอโซโทปเสถียร ควรเก็บตัวอย่างน้ำฝนให้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น เพื่อศึกษาการกระจายตัวของฝนและสัดส่วนที่มาของน้ำบาดาล ว่ามีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลจากจุดใด เพื่อมีการแปลผลองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรได้ดียิ่งขึ้น
2. ควรเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในแต่ละชั้นน้ำ เช่น ชั้นน้ำเจ้าพระยา ชั้นน้ำเชียงราย และชั้นน้ำเชียงใหม่ เพียงให้เกิดความเข้าใจถึงพลวัตการเชื่อมโยงระหว่างชั้นน้ำบาดาลได้ดียิ่งขึ้น
3. จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (ArcSWAT) พบว่า ค่าความสามารถในการเกิดน้ำท่า (Curve Number, CN) มีผลต่อแบบจำลองมากที่สุด ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาข้อมูลทางศาสตร์เพิ่มเติม เพื่อหาค่า Curve Number ของแต่ละการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษา เพื่อนำมาปรับปรุงแบบจำลองให้มีความถูกต้องมากขึ้น
4. การขาดข้อมูลการใช้น้ำบาดาลที่แท้จริง ทำให้การประเมินปริมาณการใช้น้ำทั้งหมดของพื้นที่อาจยังไม่ถูกต้องนัก ดังนั้นจึงควรส่งเสริมให้หน่วยงานในพื้นที่ทำการบันทึกอัตราการสูบน้ำบาดาลของบ่อบาดาลทั้งหมดในแต่ละพื้นที่ที่รับผิดชอบ เพื่อประเมินการใช้ทรัพยากรน้ำบาดาล และนำมาประเมินอัตราการใช้น้ำที่ถูกต้องยิ่งขึ้น
5. ควรเพิ่มจำนวนบ่อสังเกตการณ์ในการเปรียบเทียบแบบจำลองให้กระจายครอบคลุมพื้นที่ศึกษา เพื่อเพิ่มความละเอียดของข้อมูลมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- Arnold, J. G., Allen, P. M., Muttiah, R., Bernhardt, G., Bernhardt, G., Bernhardt, G., . . . Moench, M. (1995). Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques. *Ground water*, 33(6), 1010-1018. doi: 10.1111/j.1745-6584.1995.tb00046.x
- Bouchaou, L., Michelot, J., Vengosh, A., Hsissou, Y., Qurtobi, M., Gaye, C., . . . Zuppi, G. (2008). Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest of Morocco. *Journal of Hydrology*, 352(3), 267-287.
- Cao, W., Bowden, W. B., Davie, T., & Fenemor, A. (2006). Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrological Processes*, 20(5), 1057-1073.
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703.
- Fetter, C. W., & Fetter, C. (2001). *Applied hydrogeology* (Vol. 3): Prentice hall Upper Saddle River.
- Foster, S., Chilton, J., Moench, M., Cardy, F., Schiffler, M., & Schiffler, M. (2000). Groundwater in rural development. *World Bank technical paper*, 463.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. (1979). *Groundwater* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Gat, J. R., & Gonfiantini, R. (1981). Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle.
- Gu, A., Gray, F., Eastoe, C. J., Norman, L. M., Duarte, O., & Long, A. (2008). Tracing ground water input to base flow using sulfate (S, O) isotopes. *Groundwater*, 46(3), 502-509.
- Hoefs, J., & Hoefs, J. (1997). *Stable isotope geochemistry* (Vol. 201): Springer.
- Jiang, X., Huang, C.-h., & Ruan, F. (2008). Impacts of land cover changes on runoff and sediment in the Cedar Creek Watershed, St. Joseph River, Indiana, United States. *Journal of Mountain Science*, 5(2), 113-121.

- Jin, G., Shimizu, Y., Onodera, S., Saito, M., & Matsumori, K. (2015). Evaluation of drought impact on groundwater recharge rate using SWAT and Hydrus models on an agricultural island in western Japan. *Proc. IAHS*, 371, 143-148.
- Lacey, G., & Grayson, R. (1998). Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 204(1), 231-250.
- Leontiadis, I., Payne, B., Letsios, A., Papagianni, N., Kakarelis, D., & Chadjiagorakis, D. (1983). *Isotope hydrology study of Kato Nevrokopi of Drama*. Paper presented at the Proc. Symp. on Isotope hydrology.
- Luo, Y., Arnold, J., Allen, P., & Chen, X. (2012). Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), 1259-1267.
- Meredith, E. L., & Kuzara, S. L. (2012). Identification and quantification of base flow using carbon isotopes. *Groundwater*, 50(6), 959-965.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., & King, K. (2005). Soil and Water Assessment Theoretical Documentation Version 2005.
- Putthividhya, A. (2014). *Preliminary Assessment of Groundwater and Surface Water Characteristics in the Upper Chao Phraya River Basin land using Stable Isotope Fingerprinting Technique*.
- Sacks, L. A. (2002). Estimating ground-water inflow to lakes in central Florida using the isotope mass-balance approach.
- Sharp, Z. (2007). *Principles of stable isotope geochemistry*: Pearson Education Upper Saddle River, NJ.
- Sophocleous, M. (1997). Managing water resources systems: why “safe yield” is not sustainable. *Ground water*, 35(4), 561-561.
- Unesco, W. G. o. N. T. i. H. (1983). *Guidebook on nuclear techniques in hydrology*: International Atomic Energy Agency.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2553). รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการสำรวจสถานภาพบ่อน้ำบาดาลศึกษา กำหนดเครือข่ายบ่อสังเกตการณ์และประเมินการใช้น้ำบาดาลเพื่อการบริหารจัดการ

- ทรัพยากรน้ำบาดาลของประเท. กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2556). รายงานสถานการณ์น้ำบาดาลประเทศไทย โครงการวางเครือข่ายสถานีสังเกตการณ์น้ำบาดาลเพื่อติดตามสถานการณ์น้ำบาดาล. กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2553a). รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาแก้ไขปัญหาน้ำท่วมและภัยแล้งโดยการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลพื้นที่อ่างเจ้าพระยาตอนบน. กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2553b). รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาสำรวจและจัดทำแผนที่น้ำบาดาลชั้นรายละเอียด มาตรฐาน 1:50,000 (พื้นที่อ่างน้ำบาดาลเจ้าพระยาตอนบน) พื้นที่ 1. กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2549). การใช้ที่ดินในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย: กรมพัฒนาที่ดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.
- กิมลา., ว. (2556). การประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT สำหรับการจัดบัญชีน้ำในลุ่มน้ำเซโดน สปป.ลาว. *Journal of Science and Technology*, 2(3).
- โกษาแสง., ก. (2555). การจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินในโครงการเติมน้ำลงสู่ชั้นบาดาลจังหวัดสุโขทัย *Modeling of Groundwater Flow for Aquifer Storage Recovery Project in Sukhothai Province*. Paper presented at the การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสนครั้งที่ 9., นครปฐม.
- คุณธนกุลวงศ์, ส. (2551). การเปรียบเทียบเทคนิคการประเมินศักยภาพน้ำบาดาล. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 19(ฉบับที่ 3-2551).
- ชัยสายัณห์., พ. (2545). การจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินในโครงการน้ำใต้ดินสุโขทัย โดยใช้โปรแกรม MODFLOW Groundwater Model for Sukhothai Groundwater Project Using Modflow. (ปริญาโท.), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บัวผัน., ฉ. (2538). น้ำบาดาล. กรุงเทพฯ.: สำนักพิมพ์ไอเดียสโตร์. .
- ระมิงค์วงศ์., ท. (2546). น้ำบาดาล. ภาควิชาธรณีวิทยา. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.: เชียงใหม่.
- วงษาศรี., ศ. (2554). การประเมินปริมาณและคุณภาพน้ำในลุ่มน้ำพองตอนล่างโดยใช้แบบจำลอง SWAT (ปริญาโท), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- วังพิมุล., ว. (2552). คู่มือปฏิบัติการประยุกต์ใช้งานแบบจำลอง *SWAT Operation Manual on SWAT Model Applications*. กรุงเทพฯ.: ส่วนงานคณะกรรมการลุ่มแม่น้ำโขง. สำนักประสานความร่วมมือระหว่างประเทศ.กรมทรัพยากรน้ำ.
- สวัสดีปรุ, ก. (2012). การประเมินค่าดัชนีการไหลพื้นฐานในลุ่มน้ำยม. *THAICID NATIONAL SYMPOSIUM 2012*.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

ข้อมูลไอโซโทปเสถียร พื้นที่จังหวัดสุโขทัย ปี 2559

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลไอโซโทปเสถียร พื้นที่จังหวัดสุโขทัย ปี 2559

New- CODE	X	Y	Easting	Northing	Temp	$\delta^{18}\text{O}$	δD
G-01	99.66	17.12	570318.00	1892276.00	25.5	-5.73	-40.11
G-02	99.87	16.99	592532.00	1878578.00	27.0	-7.63	-55.23
G-03	99.85	16.92	589924.00	1870347.00	27.0	-6.26	-46.66
G-04	99.83	16.93	588049.00	1872240.00	27.0	-6.36	-46.86
G-05	99.86	17.00	591382.00	1879262.00	26.8	-7.69	-55.54
G-12	99.95	16.95	601285.00	1874112.00	26.0	-7.73	-57.39
G-11	99.96	17.00	601898.00	1879212.00	24.3	-0.08	-7.22
G-13	99.91	17.11	596811.00	1891242.00	28.0	-7.78	-56.97
G-08	99.85	17.25	590809.00	1906861.00	25.5	-7.98	-57.76
G-07	99.72	17.31	576227.00	1913813.00	24.0	-7.82	-57.18
G-09	99.91	17.34	596115.00	1917118.00	21.0	-5.77	-45.45
G-06	99.70	17.31	574737.00	1914292.00	26.0	-3.43	-30.61
G-10	99.90	17.34	596030.00	1917230.00	25.0	-6.41	-47.38
G-14	99.77	16.79	581685.00	1856720.00	27.0	-6.20	-46.98
G-15	99.77	16.80	581891.00	1857008.00	27.0	-7.31	-53.14
G-16	99.83	16.82	588541.40	1859717.89	27.0	-6.17	-47.12
G-17	99.87	16.82	592695.58	1860067.64	27.5	-7.20	-52.77
G-18	99.61	17.33	565082.54	1916099.12	25.0	-5.99	-45.67
G-19	99.74	17.31	578714.23	1913823.68	26.5	-7.87	-57.90
G-20	99.61	17.33	564891.10	1916153.83	25.5	-4.16	-34.98
G-21	100.04	16.97	610404.80	1876417.28	27.2	-6.58	-51.18
G-22	99.95	16.99	601235.16	1879026.22	26.7	-6.22	-47.89
G-23	99.95	16.94	600730.42	1873303.70	26.5	-3.34	-30.50

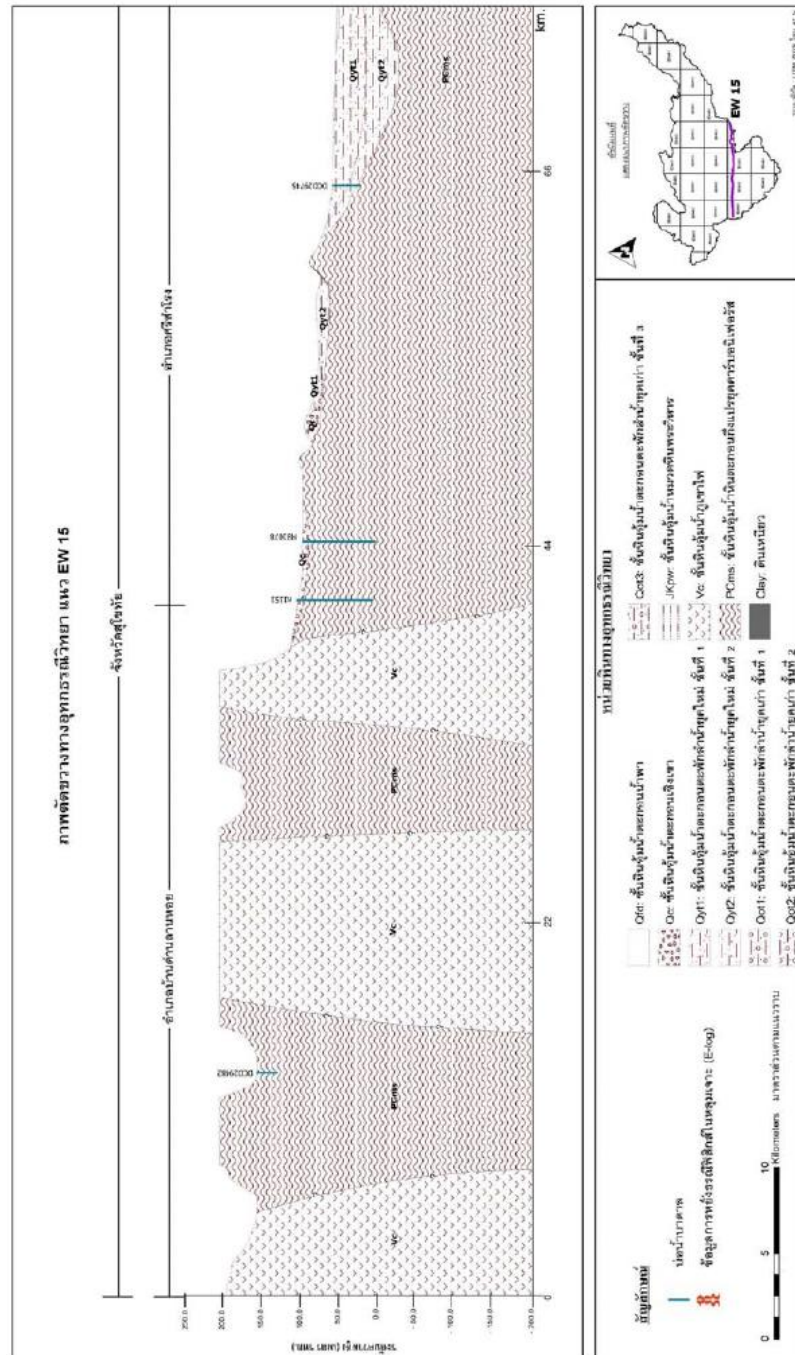
New- CODE	X	Y	Easting	Northing	Temp	$\delta^{18}\text{O}$	δD
G-24	99.96	17.03	602173.28	1883113.43	25.6	-6.61	-48.02
G-25	100.04	16.97	610404.80	1876417.28	27.0	-6.97	-52.47
G-26	99.82	17.31	586638.31	1913568.03	24.5	-5.75	-45.63
G-27	99.84	17.26	588897.30	1908543.60	26.0	-7.91	-56.43
G-28	99.89	17.10	594324.53	1891047.93	24.5	0.47	-1.16
G-29	99.88	17.09	594014.72	1890151.45	24.4	-3.27	-26.46
G-30	99.66	17.04	570708.32	1883768.29	27.0	-7.13	-49.89
G-31	99.64	17.32	568222.18	1914626.84	28.0	-8.40	-60.05
S-01	99.96	16.93	602229.00	1871729.00	26.6	-1.35	-19.04
S-02	99.82	17.02	587169.00	1882171.00	29.0	-1.58	-20.38
S-03	99.86	17.21	591759.00	1903323.00	25.8	-4.06	-31.71
S-04	99.82	17.36	586904.00	1919787.00	23.0	-3.76	-30.41
S-05	99.81	17.38	585836.00	1921221.00	23.5	-4.05	-31.24
S-06	99.76	17.52	580567.00	1937021.00	26.0	3.53	-28.93
S-07	99.78	17.55	582466.00	1939905.00	21.0	2.64	-21.09
S-08	99.78	17.55	582464.00	1940458.00	27.0	1.31	-15.05
S-09	99.68	17.66	572548.00	1952923.00	26.0	3.65	-29.72
S-10	99.64	17.73	568173.00	1960652.00	28.0	-1.80	-22.18
S-11	99.62	17.76	565511.00	1964073.00	21.5	-3.35	-30.32
S-12	99.64	17.75	567953.00	1962864.00	24.0	-4.93	-35.39
S-13	99.81	16.83	586556.32	1860484.09	28.0	1.54	-7.41
S-14	99.87	17.00	592204.89	1879570.74	27.0	0.17	-2.95

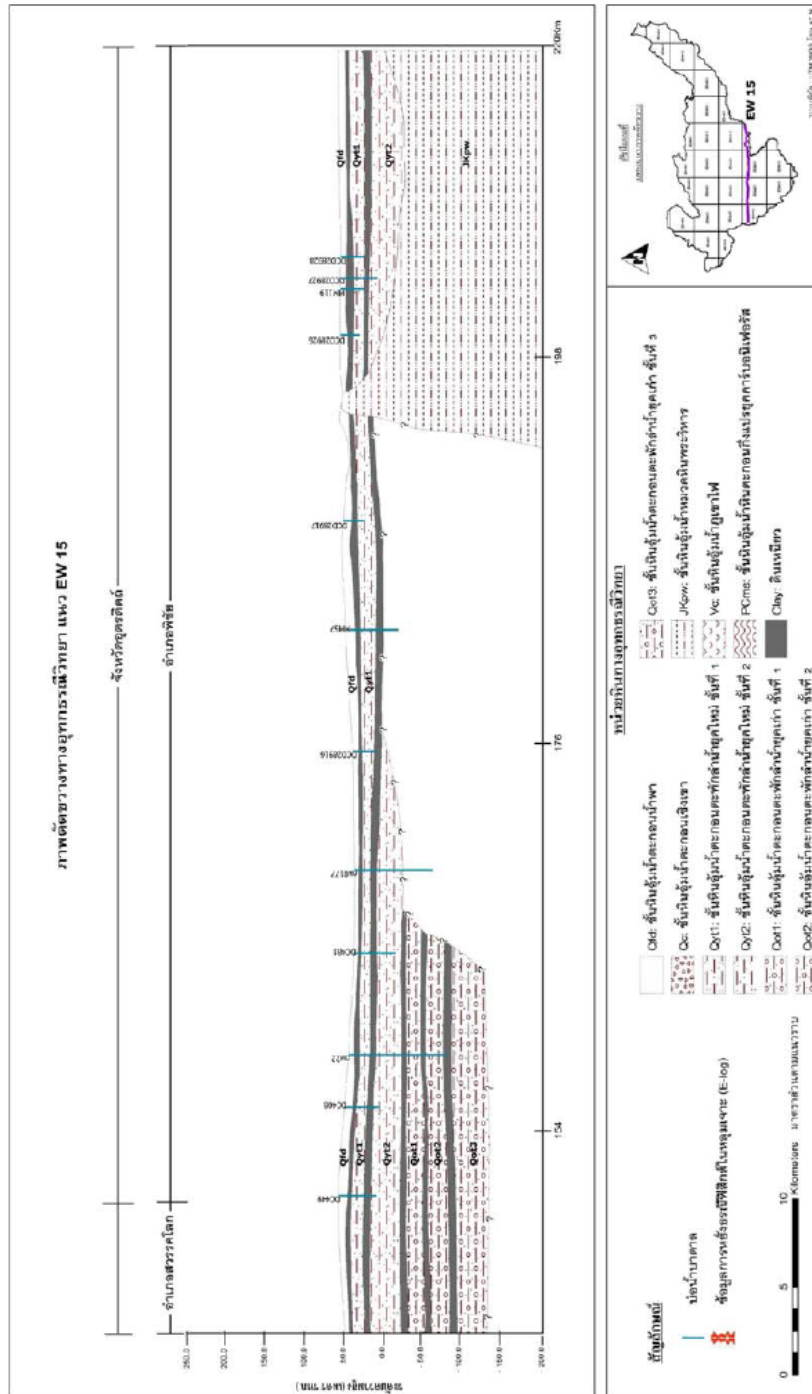


ภาคผนวก ข

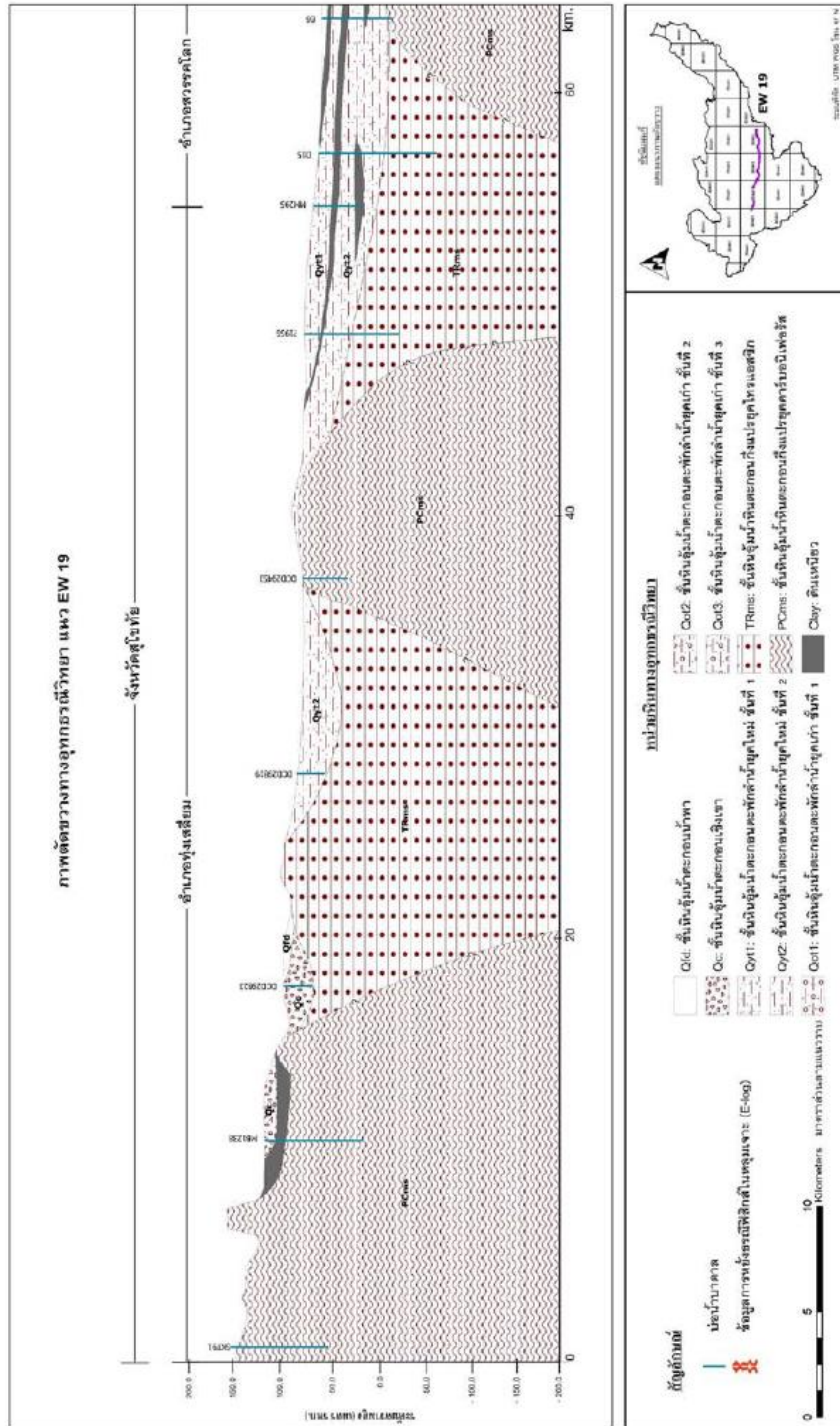
ข้อมูลภาพตัดขวางทางธรณีวิทยา พื้นที่จังหวัดสุโขทัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY





รูปที่ ข-5 ภาคตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา แนว E-W
ที่ ๕ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2552)



รูปที่ ข-6 ภาคตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา แนว E-W
ที่ 19 (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2552)



ภาคผนวก ค

ข้อมูลระดับน้ำบาดาลป่อสังเกตการณ์ พื้นที่จังหวัดสุโขทัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-1 ข้อมูลบ่อบาดาลสังเกตการณ์ พื้นที่จังหวัดสุโขทัย

ลำดับ สถานี	สถานี	ตะวันออก	เหนือ
1	NT107/1	610520	1867592
	NT107/2	610520	1867592
	NT107/3	610520	1867592
2	NT106/1	591190	1865419
	NT106/2	591189	1865421
3	NT92	600433	1878172
4	NT108/1	584016	1877166
	NT108/2	584017	1877117
	NT108/3	584017	1877117
5	NT93	570333	1892280
6	NT94/1	597364	1914282
	NT94/2	597364	1914284
7	NT95	604572	1928890
8	NT96/1	596812	1891238
	NT96/2	596812	1891238
	NT96/3	596812	1891238
9	NT97/1	580845	1893050
	NT97/2	580845	1893050
	NT97/3	580845	1893050
10	NT98/1	596571	1900567
	NT98/2	596571	1900580
11	NT99/1	597171	1926367
	NT99/2	597171	1926367
12	NT100	580671	1916871

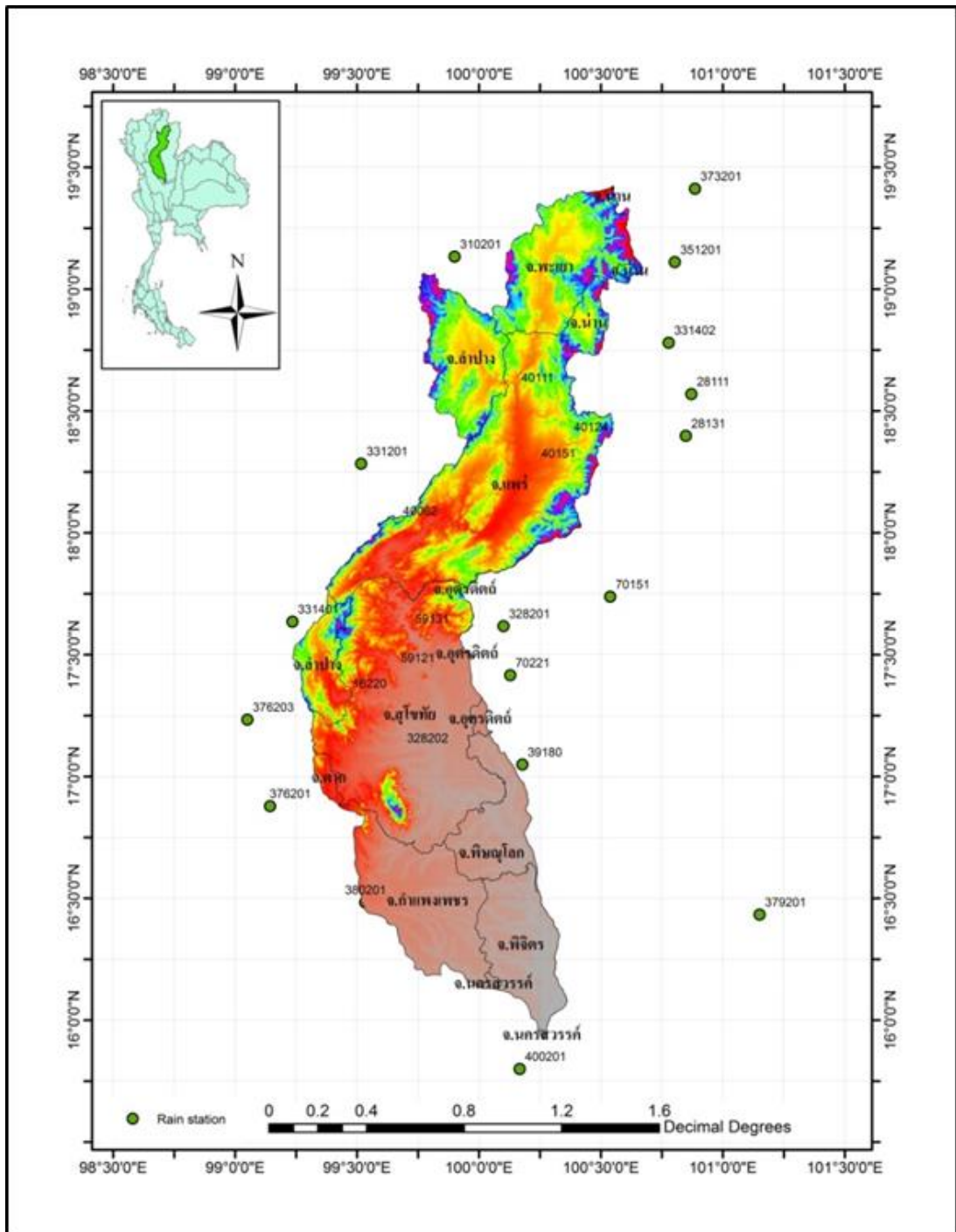
ที่มา (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล., 2553a)



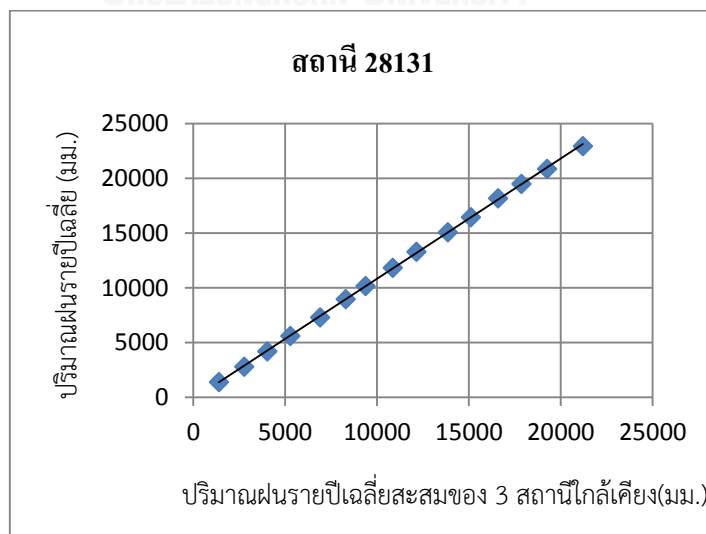
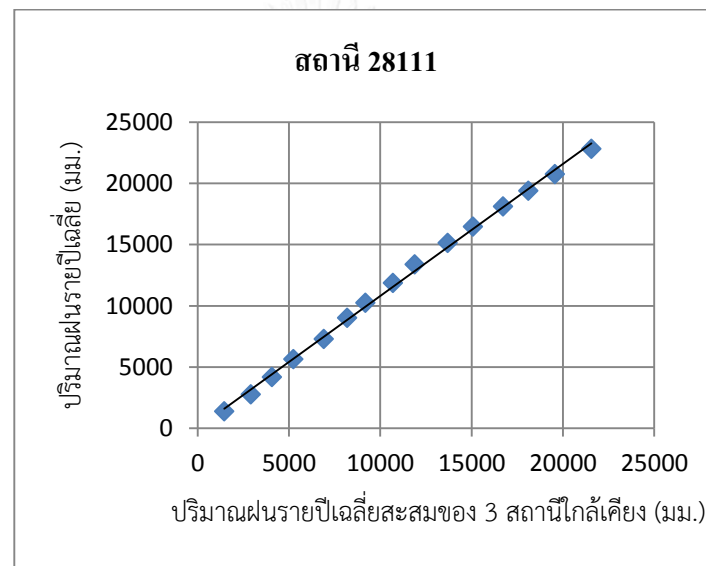
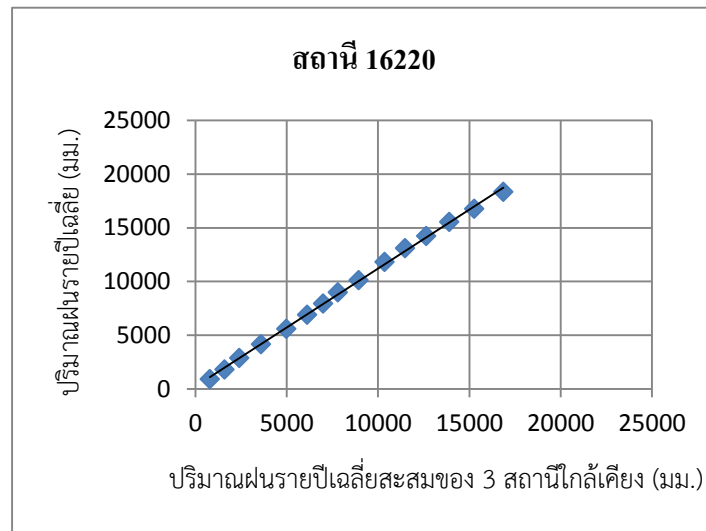
ภาคผนวก ง

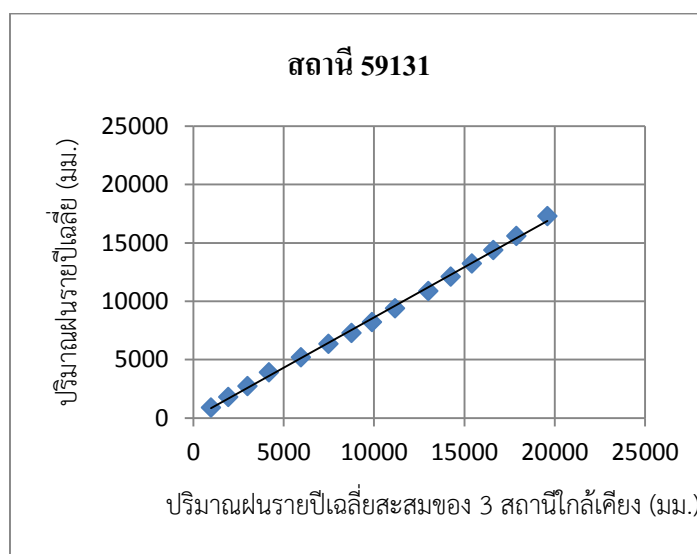
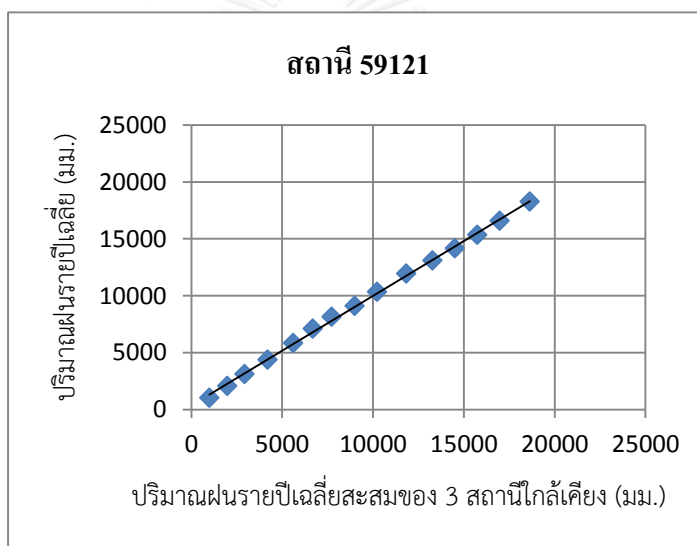
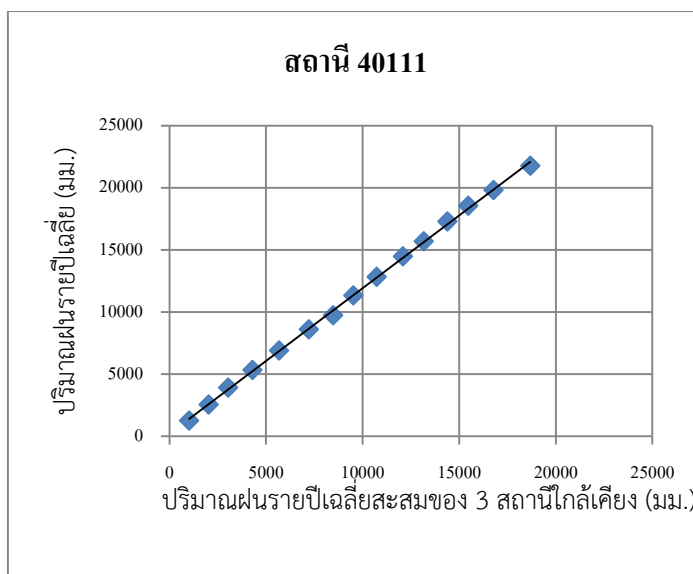
การทดสอบความสอดคล้องของปริมาณฝน ณ สถานีต่างๆ เทียบกับสถานีใกล้เคียง

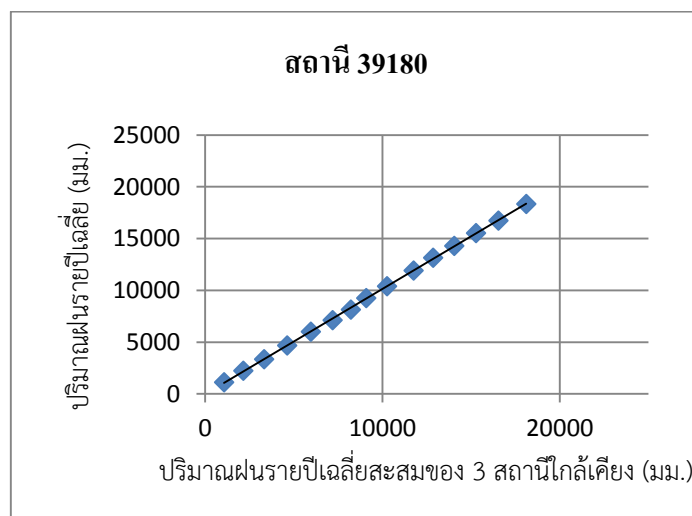
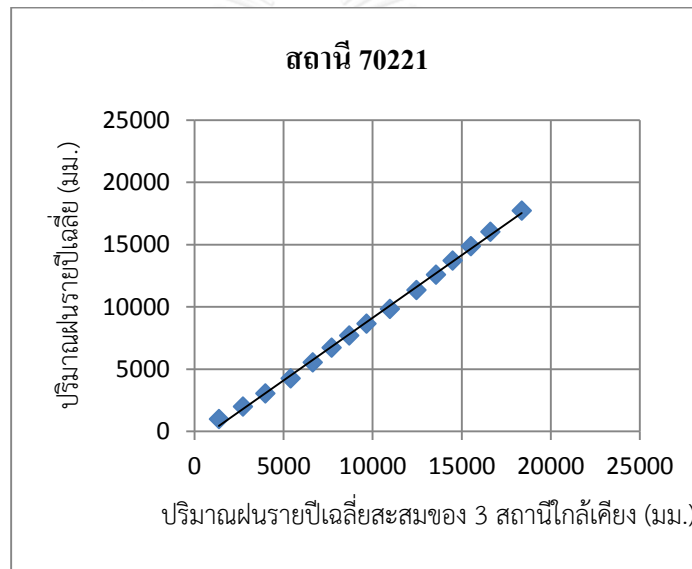
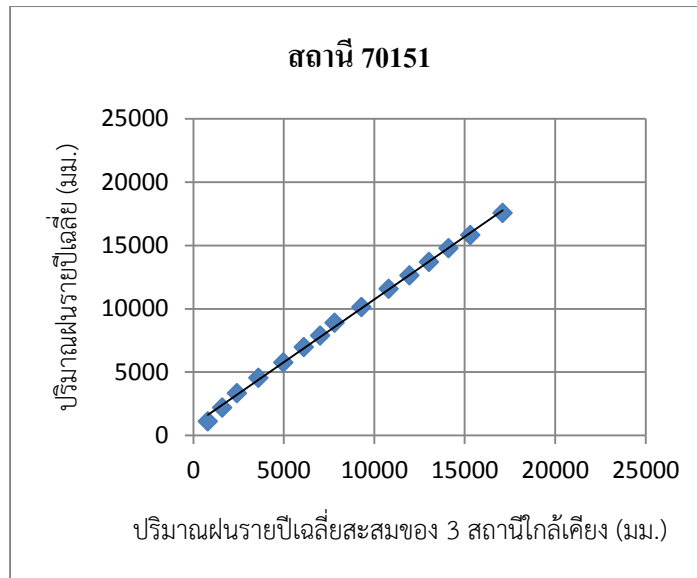
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

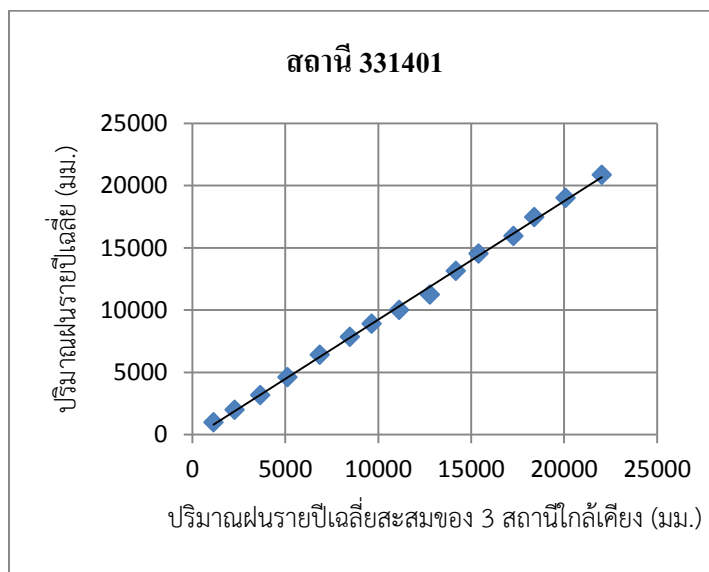
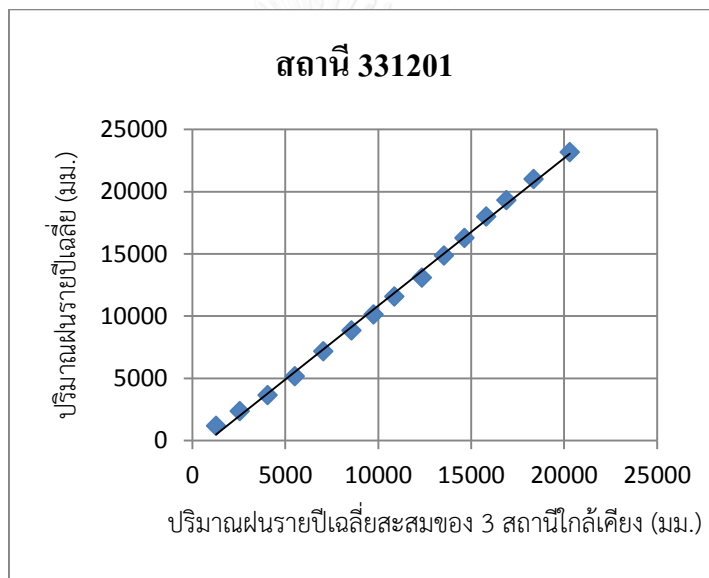
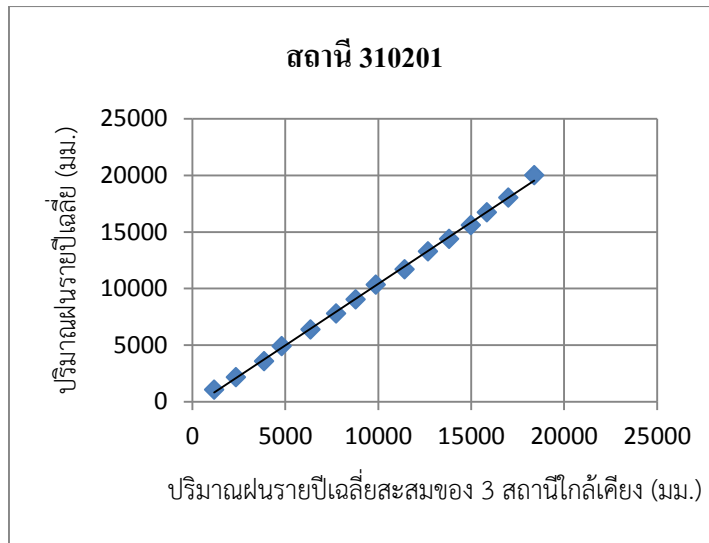


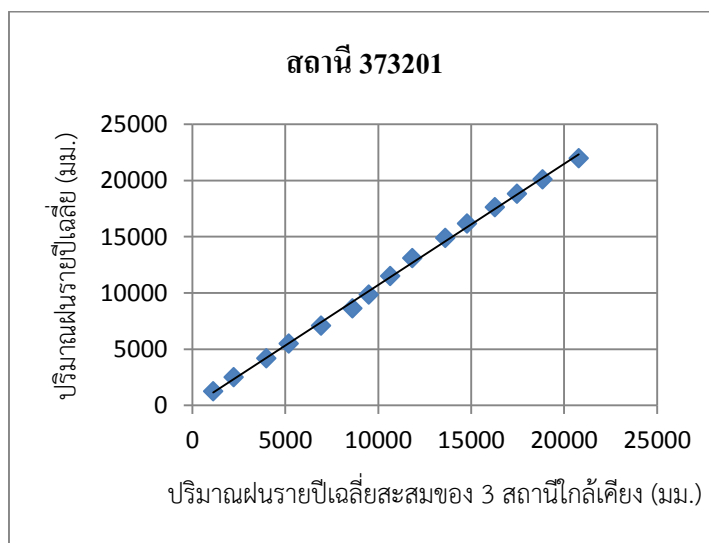
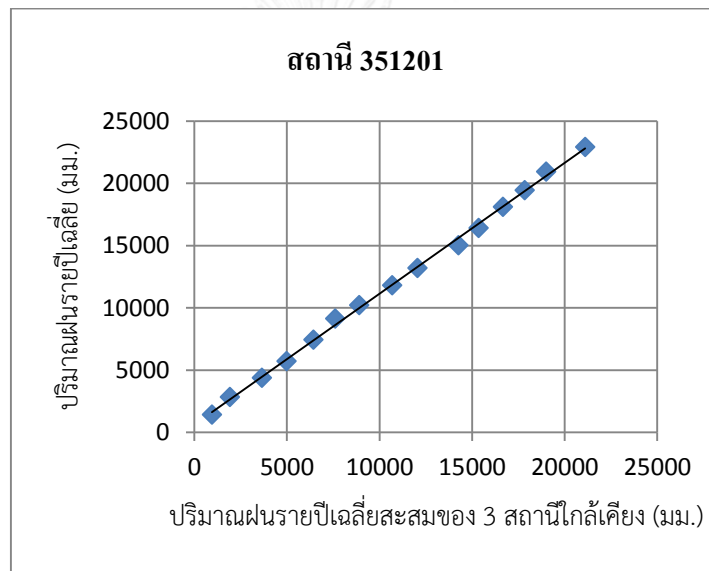
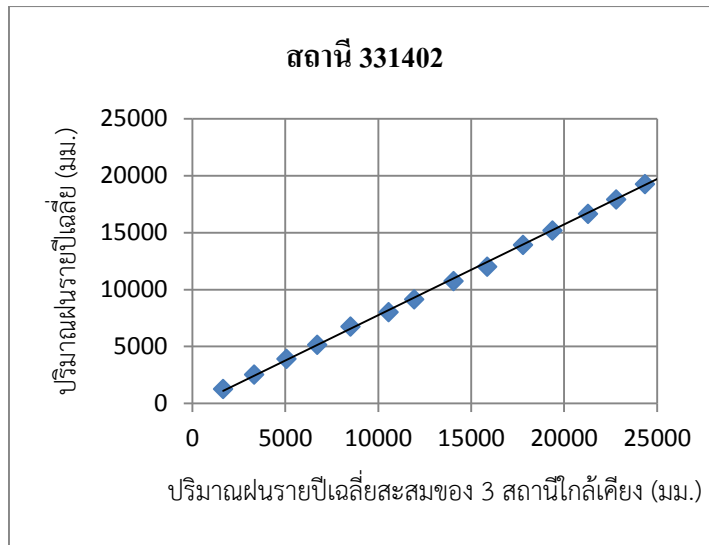
รูปที่ ง-1 สถานีตรวจวัดฝนกรมอุตุนิยมวิทยาและกรมชลประทาน

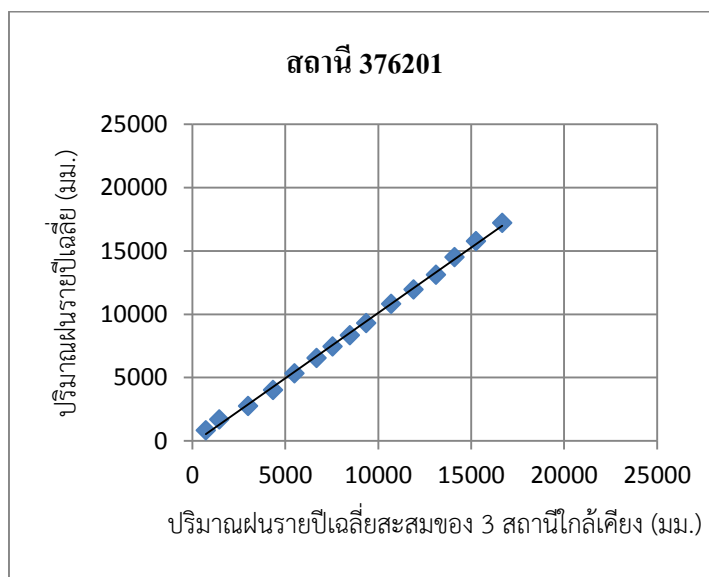
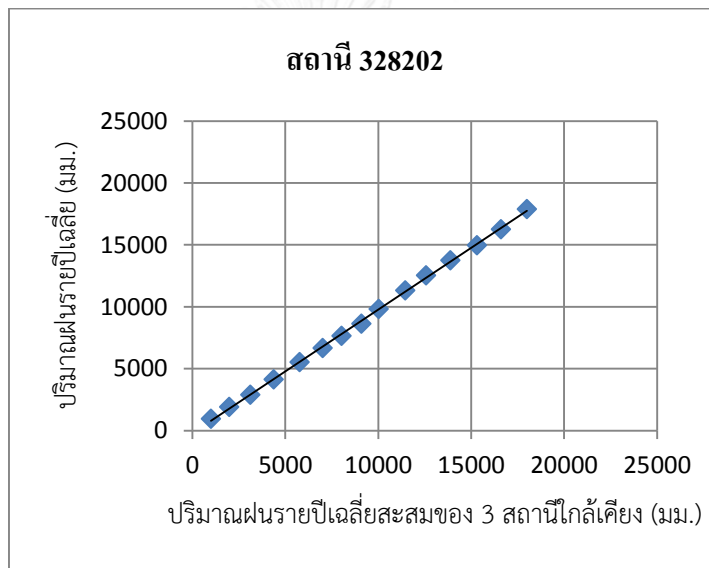
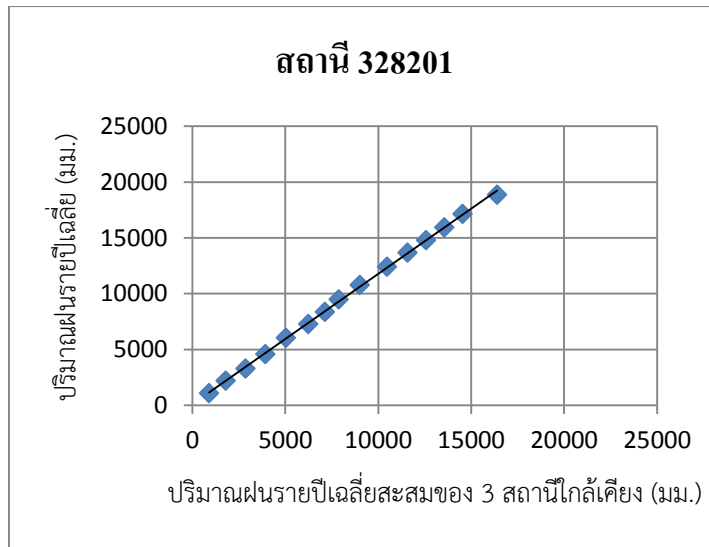


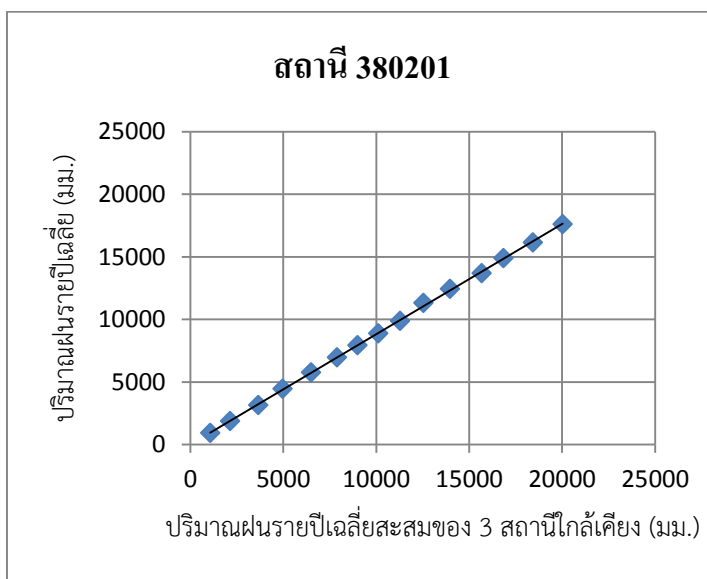
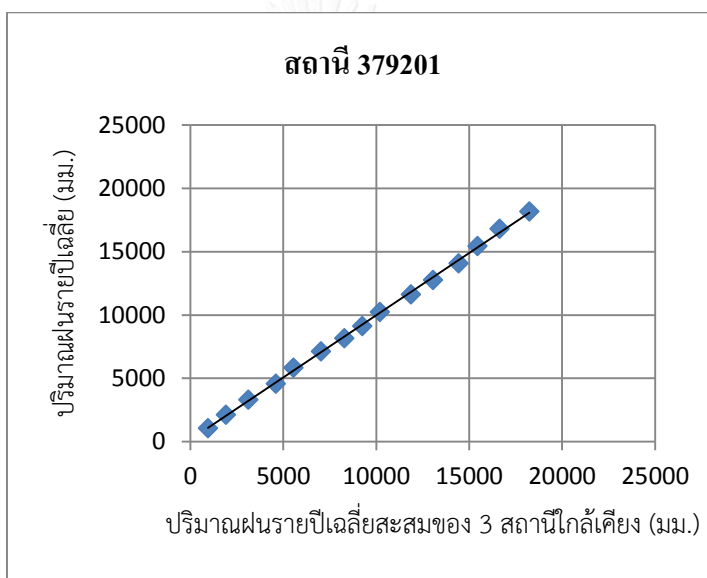
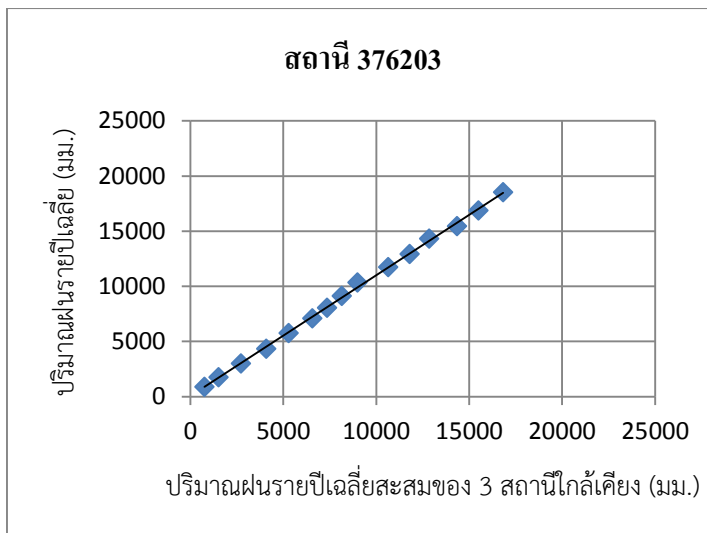


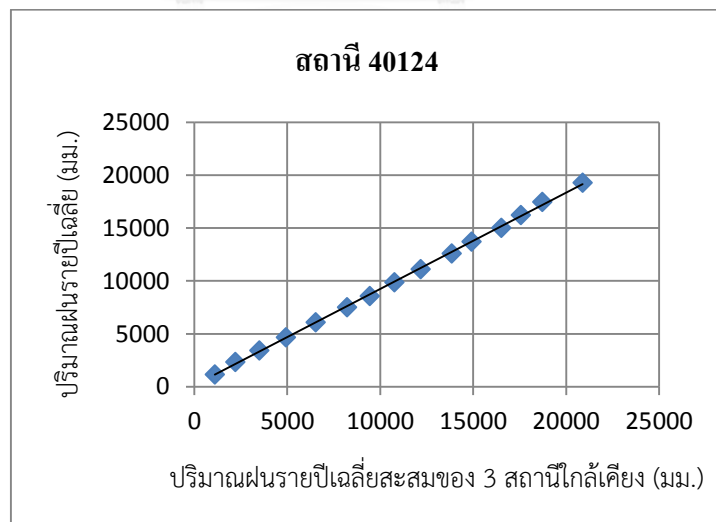
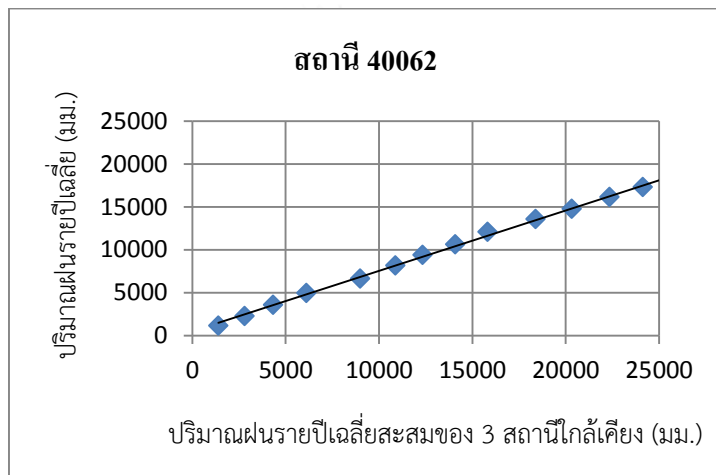
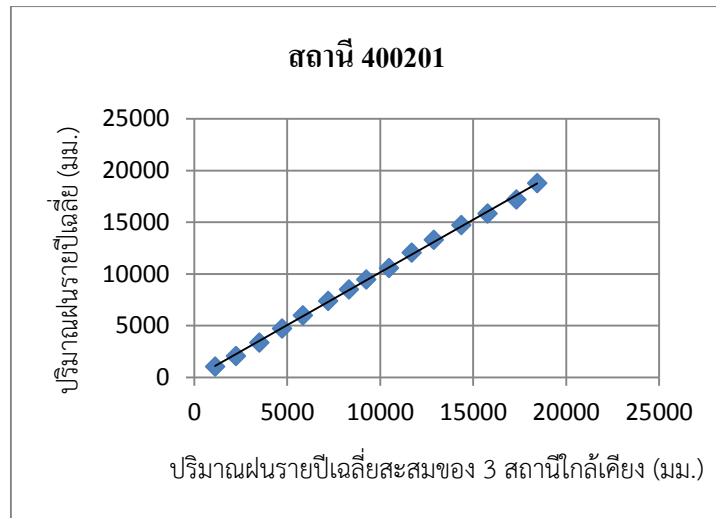












รูปที่ ง-2 กราฟทดสอบความสัมพันธ์ของฝนที่สถานีต่างๆ



ภาคผนวก จ

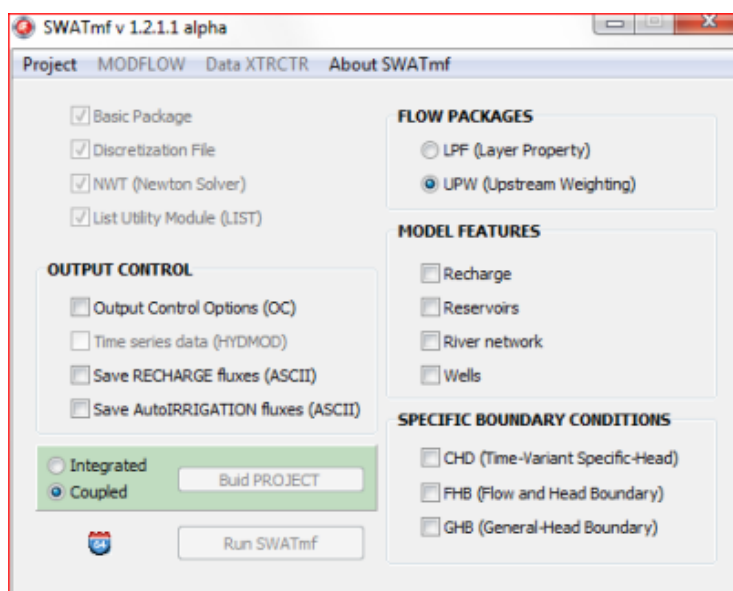
การสร้างแบบจำลองควบ น้ำฝน - น้ำท่า - น้ำบาดาล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แบบจำลองควบน้ำฝน – น้ำท่า – น้ำบาดาล

การจำลองโดยใช้แบบจำลองควบน้ำฝน – น้ำท่า – น้ำบาดาล ในการศึกษาคั้งนี้ได้แบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วนคือ แบบจำลองน้ำฝน – น้ำท่า และแบบจำลองน้ำบาดาล โดยจะจำลองแยกทั้ง 2 แบบจำลองเสียก่อน จากนั้นเชื่อมต่อแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม SWATmf โดยรายละเอียดและขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง โดยสรุปมีดังนี้

1. เริ่มจากการสร้างแบบจำลองน้ำผิวดินโดยแบบจำลอง SWAT
 - 1.1 สร้างพื้นที่ลุ่มน้ำ กำหนดรูปแบบการใช้ที่ดินและชนิดดินในพื้นที่ศึกษา และนำเข้าข้อมูลภูมิอากาศรายวัน ได้แก่ ข้อมูลฝน ข้อมูลอุณหภูมิจุด ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ข้อมูลความเร็วลม และข้อมูลการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์
 - 1.2 ดำเนินการคำนวณแบบจำลอง และทำการบันทึกผลลัพธ์เป็นรายเดือน
2. สร้างแบบจำลองน้ำบาดาล (GMS-MODFLOW) ตามขอบเขตที่อยู่ภายใต้แบบจำลองน้ำผิวดิน
 - 2.1 สร้างแบบจำลองน้ำบาดาลตามขอบเขตที่ต้องการศึกษา โดยสร้างแบบกริดเซลล์ในขอบเขตของพื้นที่ศึกษา
 - 2.2 นำเส้นลำน้ำจากแบบจำลองน้ำผิวดินมาสร้างกริดของเส้นลำน้ำในแบบจำลองน้ำบาดาล และกำหนดจุดบ่อบาดาลตัวแทน รวมทั้งนำเข้าข้อมูลพารามิเตอร์ทางอุทกธรณีวิทยา ได้แก่ สัมประสิทธิ์การให้น้ำซึมผ่านได้ สัมประสิทธิ์ความสามารถในการกักเก็บน้ำ
 - 2.3 กำหนดช่วงเวลาในการดำเนินแบบจำลองบาดาลให้สอดคล้องกับแบบจำลองน้ำผิวดิน
3. เชื่อมต่อแบบจำลองน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน โดยใช้โปรแกรม SWATmf ดังรูปที่ จ-1



รูปที่ จ-1 โปรแกรมเชื่อมต่อแบบจำลองน้ำผิวดินและน้ำบาดาล

1.แบบจำลอง SWAT

1.1 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น

1.1.1 บทนำ

แบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายผลกระทบของการใช้ที่ดินต่อทรัพยากรน้ำ ได้แก่ น้ำท่า ตะกอน และสารเคมีจากการเกษตรของพื้นที่ลุ่มน้ำตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงลุ่มน้ำที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของสภาพดิน การใช้ที่ดินและการจัดการ โดยสามารถจำลองกระบวนการทางกายภาพต่างๆที่เกิดขึ้นในลุ่มน้ำ ทั้งนี้ยังสามารถแบ่งลุ่มน้ำที่ศึกษาออกเป็นลุ่มน้ำย่อยๆ เพื่อให้แต่ละลุ่มน้ำย่อยมีลักษณะการใช้ที่ดิน หรือประเภทของดินที่คล้ายคลึงหรือแตกต่างกันได้ ข้อมูลที่ใช้กำหนดให้แต่ละลุ่มน้ำย่อยประกอบด้วย ภูมิอากาศ หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา แหล่งน้ำ ลำน้ำ และทางระบายน้ำอื่นๆ

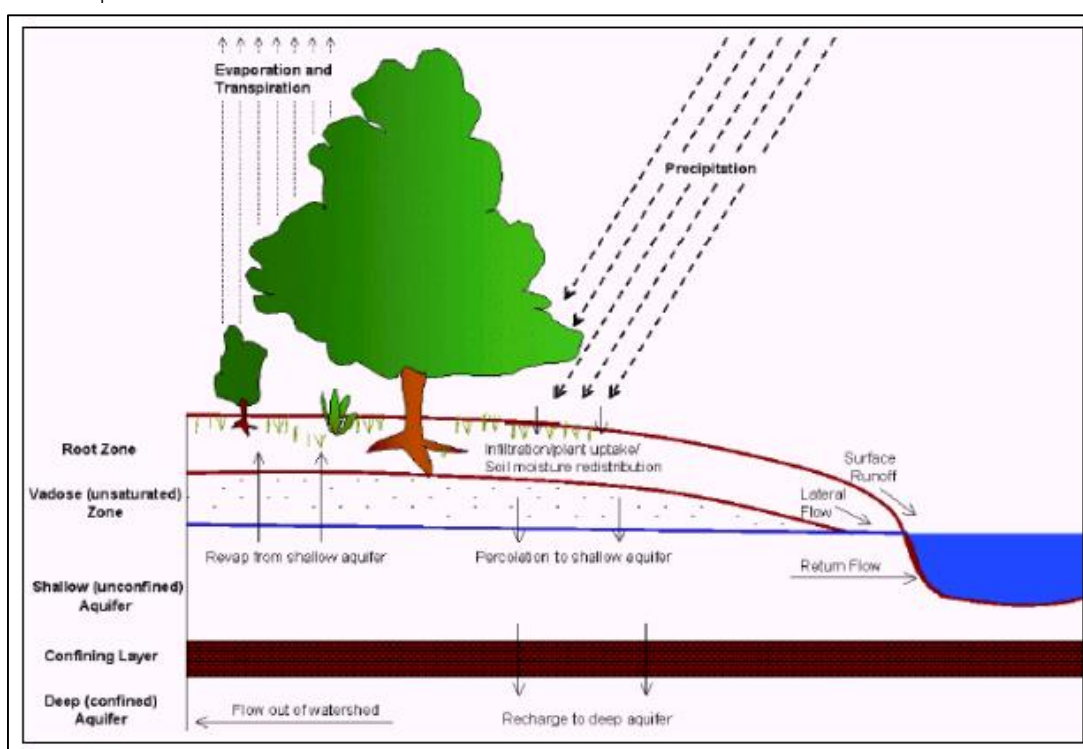
แบบจำลอง SWAT ถูกออกแบบให้สามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรม ArcGIS โดยทำงานผ่านโปรแกรม ArcSWAT เพื่อใช้ผ่านระบบภูมิสารสนเทศ โดย โปรแกรม ArcSWAT เป็นโปรแกรมเสริม (Extension) ของโปรแกรม ArcGIS SWAT พัฒนาขึ้นโดย Blackland Research Center, TAES และ United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service (USDA-ARS) เป็นแบบจำลองที่มีการพัฒนาต่อเนื่องมาตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2533 จนกระทั่งมาเป็นเวอร์ชันล่าสุด คือ SWAT2012 และ ArcSWATซึ่งมีลักษณะเป็น Public Domain Model กล่าวคือ สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องจดซื้อหรือเสียค่าลิขสิทธิ์แต่อย่างใด สามารถดาวน์โหลดโปรแกรม และคู่มือการใช้โปรแกรม ได้ที่เว็บไซต์ <http://swatmodel.tamu.edu> นอกจากนี้ในเว็บบอร์ดสำหรับใช้เป็นที่พักเรียนและนำเสนอการประยุกต์ใช้งานโปรแกรม ArcSWAT จากทุกมุมโลก

1.1.2 หลักการคำนวณของแบบจำลอง SWAT

การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง SWAT แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนพื้นดิน (Land Phase) และส่วนการเคลื่อนที่ในลำน้ำ (Routing Phase) โดยการวิเคราะห์ในส่วนพื้นดินและเป็นการศึกษาวงจรอุทกวิทยา เพื่อประเมินหาปริมาณน้ำท่า ปริมาณตะกอน ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณฟอสฟอรัส และสารเคมีจากการเกษตรที่จะไหลลงสู่ลำน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย การวิเคราะห์ของส่วนการเคลื่อนที่

ในลำน้ำจะคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำ ตะกอน ไนโตรเจน ฯลฯ ไปตามลำน้ำ ตลอดทั้งโครงข่ายลำน้ำของกลุ่มน้ำที่ศึกษา โดยสรุปรายละเอียดของการวิเคราะห์สำหรับแต่ละส่วนได้ดังนี้

1) การจำลองส่วนของพื้นดิน หรือ ส่วนพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (Upland Phase or Subbasin Component) ดังที่ (Jiang et al., 2008) ได้อธิบายไว้ว่า การวิเคราะห์ในส่วนนี้ จะเป็นการศึกษาวัฏจักรทางอุทกวิทยาเพื่อประเมินปริมาณน้ำท่า ปริมาณการตกตะกอน อุณหภูมิของดิน การเติบโตของพืช ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และปริมาณสารเคมีจากการเกษตรกรรม ก่อนไหลลงสู่ลำน้ำสายหลักในแต่ละลุ่มน้ำย่อย



รูปที่ จ-2 วงจรอุทกวิทยา (Hydrologic Cycle)

การสร้างแบบจำลองทางด้านอุทกวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย มีพื้นฐานอยู่บนสมการสมดุลของน้ำ (Neitsch et al., 2005) ดังสมการที่ จ.1

$$SW_t = SW_o + \sum (R - Q - ET - P - QR) \quad (จ.1)$$

โดย SW คือ Soil Water Content ที่ความตื้น 15 บรรยากาศ
 R คือ ค่าของฝนรายวัน (Daily Precipitation)
 Q คือ ค่าของน้ำท่ารายวัน (Daily Runoff)

ET	คือ	ค่าของการระเหยของน้ำรายวัน (Daily Evapotranspiration)
P	คือ	อัตราการซึมรายวัน (Daily Infiltration)
QR	คือ	ค่าของอัตราการไหลย้อนกลับรายวัน (Daily Return Flow)

ขั้นตอนการจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยา จะกำหนดให้ปริมาณฝนที่ตกลงสู่พื้นดินถูกพืชกักไว้เป็นบางส่วน ปริมาณฝนส่วนที่เหลือจะไหลลงสู่ผิวดินหรือซังนอนบนผิวดิน แล้วไหลลงสู่ที่ต่ำจนกระทั่งไปอยู่ในแม่น้ำลำธารกลายเป็นน้ำท่า สำหรับปริมาณน้ำที่ไหลซึมลงดิน ส่วนหนึ่งจะถูกเก็บไว้ในเนื้อดิน ซึ่งต่อมาจะระเหยคืนสู่บรรยากาศโดยผ่านการคายน้ำของพืช และอีกส่วนหนึ่งจะไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำบาดาล กลายเป็นน้ำบาดาลท้ายที่สุดก็จะไหลลงสู่แม่น้ำ เมื่อผ่านไปช่วงเวลาหนึ่งด้วยการไหลไปทางด้านข้างของน้ำใต้ดิน หรือเรียกว่า การไหลพื้นฐาน (Baseflow) การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำ มีรายละเอียดพื้นฐานการคำนวณของการเคลื่อนที่ในส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.1) น้ำท่าผิวดิน (Surface Runoff)

การคำนวณปริมาณของน้ำท่าผิวดินและค่าอัตราการไหลของน้ำท่าสูงสุดโดยใช้ข้อมูล ฝนรายวันด้วยการประยุกต์ใช้ Soil Conservation Service (SCS) Curve Number ซึ่งในการใช้วิธีนี้ ข้อมูลของค่าฝนรายวัน เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญสำหรับวิธี SCS มาก การวัดปริมาณฝนหลายๆ ตำแหน่ง โดยข้อมูลที่มีช่วงการเก็บข้อมูลฝนที่มีค่าน้อยกว่า 1 วัน จะไม่มีผลต่อแบบจำลอง แต่จะมีผลต่อความละเอียดถูกต้องของการคำนวณน้ำท่า สำหรับการปริมาณอัตราการไหลสูงสุดจะใช้วิธี Modified Rational Formula น้ำท่าผิวดินจะทำการทำนายจากค่าฝนรายวันโดยการใช้สมการ SCS ดังสมการที่ จ.2 และ จ.3

$$Q = \frac{(R-0.2s)^2}{R+0.8s}, R > 0.2s \quad (จ.2)$$

$$Q = 0.0, R < 0.2s \quad (จ.3)$$

เมื่อ	Q	คือ	ค่าของน้ำท่ารายวัน (m^3/s)
	R	คือ	ค่าของฝนรายวัน (mm)
	s	คือ	Retention Parameter (mm)

โดยตัวแปร s จะมีความสัมพันธ์กับค่า Curve Number (CN) จากดังสมการสมการที่ จ.4

$$s = 254 \frac{100}{CN} - 1 \quad (จ.4)$$

เมื่อ	CN	คือ	ค่า Curve Number หรือค่าความโค้งของการเกิดน้ำท่า
-------	----	-----	--

แบบจำลอง SCS เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณหาค่า Surface Runoff โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

1. Infiltration Models เป็นการหาจากการไหลซึมของน้ำลงดิน โดยส่วนของน้ำที่ไม่ไหลซึมลงดินก็คือ Run Off สำหรับวิธีการหาที่มีด้วยกันหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น วิธีโครงสร้างของดิน (Physically Based) วิธีการประมาณค่าแบบจำลองการไหลซึมโดยประมาณ (Approximate Theory - Based Infiltration Models) Green-Ampt Model วิธีการจากการทดลองวัดค่าการไหลซึม (Empirically Based) เป็นต้น

2. Rainfall Excess Models เป็นแบบจำลองที่คำนวณหาน้ำท่า (Runoff) และส่วนที่ไม่ใช่น้ำท่าหรือน้ำที่เก็บไว้ที่ผิวดินที่ต่ำ (Surface Depressions) หรือน้ำส่วนที่ค้างบนใบพืช (Intercepted)

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่า CN (Fetter & Fetter, 2001) มีดังนี้ คือ

1. คุณสมบัติทางอุทกวิทยาของดิน (Hydrologic Soil Group)

แบ่งกลุ่มดินออกเป็น 4 กลุ่มคือ A, B, C และ D โดยแต่ละกลุ่มดินจะขึ้นอยู่กับอัตราการซึมน้ำของดินสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- 1) ดินกลุ่ม A มีอัตราการซึมสูง และอัตราการไหลผิวดินต่ำ ส่วนใหญ่เป็นดิน ประเภท ดินทราย (Sandy Soils) โดยมีค่า $K_{sat} > 0.76$ cm/hr
- 2) ดินกลุ่ม B มีอัตราการซึมปานกลาง เป็นดินที่ระบายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นดินประเภท ดินร่วน (Loam Soils) โดยมีค่า $0.38 < K_{sat} < 0.76$ cm/hr
- 3) ดินกลุ่ม C มีอัตราการซึมต่ำ จะประกอบด้วยชั้นดินอย่างน้อย 1 ชั้น ที่ขัดขวางการระบายน้ำ ส่วนใหญ่เป็นดินประเภทดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay Loam) โดยมีค่า $0.13 < K_{sat} < 0.38$ cm/hr
- 4) ดินกลุ่ม D มีอัตราการซึมต่ำมาก เป็นดินที่มีศักยภาพทำให้เกิดน้ำท่าผิวดินสูง ส่วนใหญ่เป็นดินประเภทดินเหนียว (Clay) โดยมีค่า $K_{sat} < 0.38$ cm/hr

2. สิ่งปกคลุม (Cover) คือสิ่งต่างๆ ที่ปกคลุมดินและป้องกันการกระแทกของเม็ดฝนที่ตกลงมาสู่ดิน ประกอบด้วย

- 1) ลักษณะการใช้ที่ดิน (Land Use)
- 2) การรักษาน้ำดิน (Land Treatment) จะเกี่ยวข้องกับลักษณะและวิธีการปลูกพืชการเตรียมแปลง โดยแบ่งออกเป็น การทำการเพาะปลูกเป็นแถว (Straight - Row) การทำการเพาะปลูกเป็นแถวค้ำยตามระดับพื้นที่ (Contoured) และการทำการเพาะปลูกเป็นขั้นบันได (Terraced)
- 3) สภาพอุทกวิทยา (Hydrologic Condition) โดยแบ่งออกเป็น
 - 1) สภาพเลว (Poor) มีพืชคลุมดินพื้นที่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์
 - 2) สภาพปานกลาง (Fair) มีพืชคลุมดินพื้นที่ระหว่าง 50 - 75 เปอร์เซ็นต์
 - 3) สภาพดี (Good) มีพืชคลุมดินพื้นที่มากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์

4.) การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use Classification)

- 1) ไม้ป่า (Wood, Forest)
- 2) ไม้เกษตรกรรม (Agriculture)
- 3) ไม้โล่งเตียนและพื้นที่อยู่อาศัย (Bare-Land & Residential)
- 4) ไม้ที่เป็นน้ำ (Water Body)

5.) เงื่อนไขความชื้นในดินเริ่มต้น (Antecedent Moisture Content; AMC) มีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นในดินโดยพิจารณาปริมาณฝนสะสมทั้งหมดที่ตกก่อนหน้าพายุฝนที่พิจารณา 5 วัน รวมทั้งพิจารณาช่วงฤดูการเพาะปลูกด้วย โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี สำหรับค่า CN จึงต้องมีการปรับแก้ค่า CN ให้อยู่ในกรณีเดียวกับ AMC ในกรณีต่างๆตามเงื่อนไขความชื้นในดินก่อนหน้าที่คำนวณได้โดยในการปรับค่า CN คำนวณได้ดังสมการที่ จ.5 และ จ.6

$$CNI = \frac{CNII}{(2.281 - 0.0128CNII)} \quad (จ.5)$$

$$CNIII = \frac{CNII}{(0.427 - 0.00573CNII)} \quad (จ.6)$$

1.2) อัตราการไหลสูงสุด (Peak Runoff Rate)

แบบจำลอง SWAT ประมาณค่าอัตราการไหลสูงสุดโดยใช้วิธี Modified Rational Formula แสดงดังสมการที่ จ.7

$$q_p = \frac{CIA}{360} \quad (จ.7)$$

เมื่อ	q_p	คือ	อัตราการไหลสูงสุด (ลบ.ม./วินาที)
	C	คือ	สัมประสิทธิ์น้ำท่าที่แสดงถึงลักษณะอัตราการซึมของพื้นที่ลุ่มน้ำ
	I	คือ	ความเข้มของฝน (มม./ชั่วโมง) สำหรับ Time of Concentration ของพื้นที่ลุ่มน้ำ
	A	คือ	พื้นที่การระบายน้ำ (ตารางกิโลเมตร)

1.3) การไหลด้านข้างใต้ผิวดิน (Lateral Subsurface Flow)

การจำลองการไหลทางข้างใต้ผิวดินโดยใช้แบบจำลอง Kinematic Storage Model ซึ่งได้รับการพัฒนาโดยใช้สมการมวลคงที่ Mass Continuity Equation โดยมี Control Volume คือ Soil

Profile สำหรับสมการ Mass Continuity Equation ในสมการ Finite Difference สำหรับ Kinematic Storage Model เป็นดังสมการที่ จ.8

$$\frac{SV_2 - SV_1}{t_2 - t_1} = \frac{iL - q_{lat1} - q_{lat2}}{2} \quad (จ.8)$$

เมื่อ	SV	คือ	ปริมาณน้ำในดินที่สามารถไหลออกมาจากดินในส่วนชุ่มน้ำ (m/m)
	t	คือ	เวลา (hr)
	q _{lat}	คือ	อัตราการไหลทางข้าง (m ³ /hr)
	i	คือ	อัตราการไหลเข้าของน้ำในสวนดินชุ่มน้ำ Saturated Zone (m ² /hr)
	L	คือ	Hill Slope Length (m)
	1 และ 2	คือ	ตัวที่อ้างถึงเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดในแต่ละช่วง

1.4) การไหลของน้ำบาดาล (Groundwater Flow)

การจำลองการไหลของน้ำบาดาลประกอบไปด้วย 4 ส่วน Control Volume คือ ผิวดิน เขตดิน ชั้นรากพืช Shallow Aquifer และ Deep Aquifer ซึ่งก็คือ พื้นที่การไหลของลำน้ำ (Stream flow area) น้ำท่าผิวดิน การไหลด้านข้างในเขตรากพืชและน้ำไหลกลับ (Return flow) จาก Shallow Aquifer ซึ่งจะมีน้ำส่วนหนึ่งที่ไหลซึมลึกลงดินลงสู่ชั้น Deep Aquifer โดยจะเป็นน้ำที่เป็นส่วนที่สูญเสียไปของระบบ และจะไม่มีไหลย้อนกลับออกมา สำหรับสมดุลของน้ำสำหรับ Shallow Aquifer แสดงดัง สมการที่ จ.9

$$V_{sa_i} = V_{sa_{i-1}} + Rc - revap - q_{rf} - perc_{gw} - WU_{SA} \quad (จ.9)$$

เมื่อ	V _{sa}	คือ	ความจุของ Shallow Aquifer
	Rc	คือ	น้ำที่ซึมลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น (Recharge)
	revap	คือ	น้ำที่ไหลจาก Shallow Aquifer กลับสู่ Soil Profile หรือ Root Zone
	q _{rf}	คือ	Return Flow
	perc _{gw}	คือ	น้ำไหลซึมลึกลงดินสู่ชั้น Deep Aquifer
	WU _{SA}	คือ	น้ำใช้การ (Water Use หรือ Withdrawal) จาก Shallow Aquifer
	i	คือ	จำนวนวัน

สำหรับสมดุลของน้ำของ Deep Aquifer แสดงดังสมการที่ จ.10

$$V_{da_i} = V_{da_{i-1}} + perc_{gw} - WU_{DA} \quad (จ.10)$$

เมื่อ	Vda	คือ	Deep Aquifer Storage
	perc _{gw}	คือ	น้ำไหลซึมลึกกลงดินสู่ชั้น Deep Aquifer
	WU _{DA}	คือ	น้ำใช้การ (withdrawal) จากชั้น Deep Aquifer

1.5) การระเหยของน้ำ (Evapotranspiration)

สำหรับในแบบจำลองได้มีทางเลือกในการประมาณค่าการระเหยของน้ำ 3 วิธี

- 1.5.1) วิธี Penman–Monteith ต้องการข้อมูลการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ อุณหภูมิของอากาศ ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์
- 1.5.2) วิธี Priestley–Taylor ต้องการข้อมูลการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์และอุณหภูมิของอากาศ
- 1.5.3) วิธี Hargreaves and Samani ต้องการข้อมูลอุณหภูมิของอากาศเพียงอย่างเดียว

2) การจำลองส่วนของการเคลื่อนตัวของน้ำ (Routing Phase) จะเป็นการคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านทางน้ำ และการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านอ่างเก็บน้ำ การเคลื่อนตัวของตะกอนในทางน้ำ การพัฒนา และการแพร่กระจายของสารเคมีปนเปื้อนชนิดต่างๆ ในลำน้ำ ตลอดทั้งโครงข่ายของระบบลุ่มน้ำที่ทำการศึกษา

แบบจำลอง SWAT ใช้การเคลื่อนตัวของน้ำด้วยวิธีทางอุทกวิทยา (Hydrologic Flow Routing) ด้วยการคำนวณการเคลื่อนตัวของน้ำผ่านทางน้ำเป็นช่วงเวลารายวัน (Daily Time Step) และไม่มีการคำนวณซ้ำ (Iteration) ทำให้สามารถทำการจำลองแบบได้ ในระยะเวลาที่ยาวนานบนพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่ได้ และสามารถลดข้อมูลที่เป็นรายละเอียดของหน้าตัดทางขวางของทางน้ำ โดยสมมติให้ขนาดของทางน้ำสายหลักมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูความลาดเททางข้าง (Channel Side Slope) เป็น 2:1

สำหรับพื้นที่ทุ่งน้ำท่วม (Floodplain) แบบจำลองจะทำการสร้างขึ้น เมื่อปริมาณน้ำในทางน้ำ มีความลึกมากกว่าความลึกทั้งหมดของลำน้ำ โดยจะกำหนดให้ความกว้างของทุ่งน้ำท่วมกว้าง เป็น 5 เท่าของความกว้างด้านบนของทางน้ำ และความลาดเททางข้างเป็น 4:1 ข้อมูลน้ำเข้าของทางน้ำ ประกอบด้วยความยาวของช่วงทางน้ำ ความลาดชันทางน้ำ ความลึกทางน้ำ ความกว้างทางน้ำด้านบน ความลาดเทของทุ่งน้ำท่วม ค่าสัมประสิทธิ์ Manning's n ของทางน้ำและทุ่งน้ำท่วม โดยแบบจำลอง SWAT สามารถทำการเตรียมข้อมูลนำเข้าพื้นฐานอย่างเช่น ความยาวลำน้ำ ความลาดเท ท้องน้ำ เป็นต้น ปริมาณน้ำไหลออกจากช่วงของลำน้ำหาได้จากสมการที่ จ.11 และ จ.12

$$O_i = SC (I_i + S_{i-1}) \quad (จ.11)$$

เมื่อ	O_i	คือ	ปริมาณน้ำไหลออก (m^3)
	I_i	คือ	ปริมาณน้ำไหลเข้า (m^3)
	S_{i-1}	คือ	ปริมาณความจุของช่วงลำน้ำของวันก่อน (m^3)
	SC	คือ	ค่า Storage Coefficient สามารถประมาณค่าโดยใช้สมการ ดังนี้

$$SC = \frac{48}{2TT+24} \quad (จ.12)$$

เมื่อ TT คือ Travel Time (ชั่วโมง)
การคำนวณค่า Travel Time โดยการแบ่งช่วงความยาวทางน้ำ จากอัตราเร็วของน้ำซึ่งค่า Travel time จะมีความสัมพันธ์กับการไหลแบบ Non-Linear ดังแสดงในสมการที่ จ.13

$$TT = X_1qr^{X_2} \quad (จ.13)$$

เมื่อ X_1, X_2 คือ ค่า Parameter ของแต่ละช่วงของทางน้ำเมื่อมีการไหลอยู่ในทางน้ำ
 qr คือ อัตราการไหล (m^3 / hr)
อัตราการไหลและอัตราเร็วของน้ำเฉลี่ย จะคำนวณโดยใช้สมการ Manning's Equation จะทำการคำนวณที่เต็มความลึกของทางน้ำ และที่ 0.1 ของความลึกของทางน้ำ ตามลำดับ โดยสมการอัตราการไหลสามารถเขียนได้ดังสมการที่ จ.14

$$qr = \frac{A}{n} R^{2/3} \sqrt{S} \quad (จ.14)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล (Flow Area)
R คือ รัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic Radius)

1.1.3 การติดตั้งโปรแกรม ArcSWAT

แบบจำลอง SWAT สามารถดาวน์โหลดผ่านเว็บไซต์ <http://swat.tamu.edu/> โดยมีส่วนที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

- ARCSWAT 2012.10.15 (For ARCGIS 10.2.2, 10.1 SP1) and 10.0 SP5 เป็นเวอร์ชันล่าสุด (10 พฤษภาคม 2558) เป็นฟังก์ชันเสริมของแบบจำลอง SWAT ที่ใช้งานผ่านโปรแกรม ARCGIS 10.2

- SWATeditor 2012.10.15 สามารถใช้เพื่อร่วมกับแบบจำลอง ARCSWAT ได้โดยตรง โดยไม่ต้องใช้งานผ่านโปรแกรม ARCGIS เป็นโปรแกรมนำเข้าและแก้ไขข้อมูล เพื่อนำข้อมูลเข้าสู่ Database ของโปรแกรม

- SWAT Check เป็นโปรแกรมเสริม เพื่อใช้ในการตรวจสอบผลการจำลองความสมเหตุสมผล เพื่อใช้ในการปรับเทียบหรือจำลองในขั้นตอนต่อไปหรือไม่

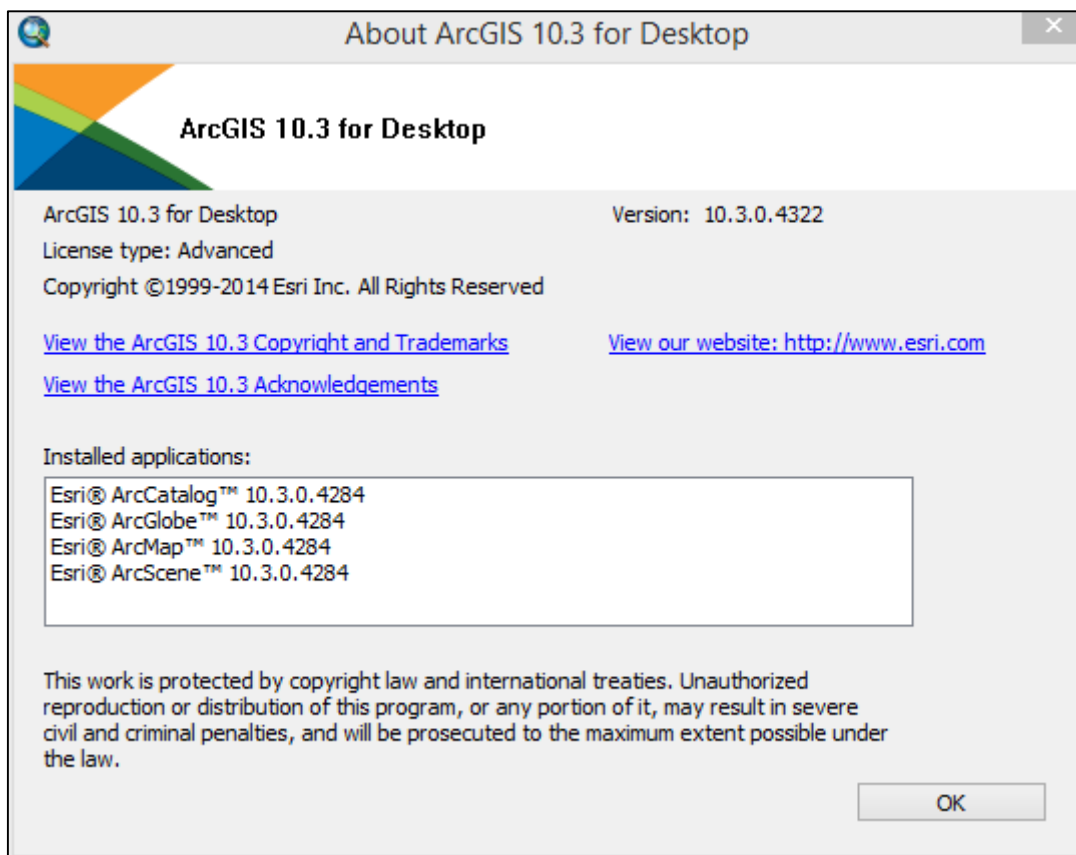
1) ความต้องการเบื้องต้นของเครื่องคอมพิวเตอร์

ในการติดตั้งและใช้งานโปรแกรม ArcSWAT เครื่องคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความสามารถต่ำสุด ดังนี้

- Personal Computer: Intel Core2Duo i3 ที่มีความเร็วอย่างน้อย 2 GHz
- RAM อย่างน้อย 1 GB
- ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 7 หรือ Windows XP
- พื้นที่ว่างในฮาร์ดดิสก์อย่างน้อย 500 MB สำหรับติดตั้งโปรแกรม
- โปรแกรม ArcGIS ArcView 10.2 version
- ArcGIS Spatial Analyst 10.2 extension

2) การติดตั้งโปรแกรม

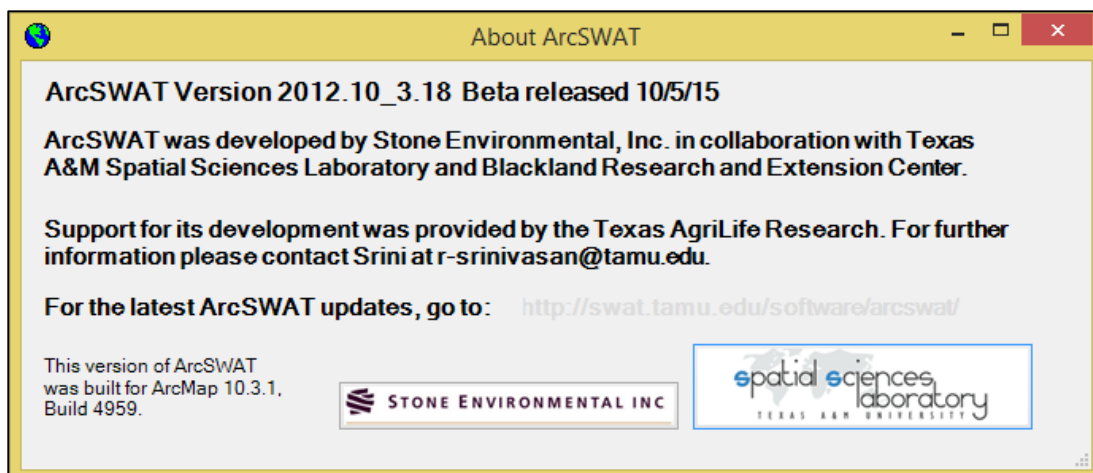
- ดาวน์โหลดโปรแกรมจากเว็บไซต์ <http://swatmodel.tamu.edu>
- ติดตั้งโปรแกรม ARCGIS 10.3 พร้อมทั้ง SP1 หรือ 10.2 พร้อมทั้ง SP5 และตรวจสอบว่ามีค่า Build เท่ากับ 4959 โดยดูได้จากเมนู Help -> About ARCMAP



- เลือกไปยังไดเรกทอรีที่เก็บไฟล์ ARCSWAT ที่ดาวน์โหลด ประกอบด้วย โฟลเดอร์ ArcSWAT_Install_2012.10_1.7 เลือกเปิดไฟล์ Setup.exe จะปรากฏดังภาพ กด OK เพื่อติดตั้งแบบจำลอง



- หลังจากติดตั้งสามารถตรวจสอบเวอร์ชันของแบบจำลอง SWAT ได้จากเมนู SWAT Project Setup -> About ArcGIS ArcSWAT



1.2. การสร้างแบบจำลองทางอุทกวิทยา

1.2.1 การจัดเตรียมข้อมูล

ข้อมูลที่จะต้องจัดเตรียมสำหรับการใช้งานแบบจำลอง ArcSWAT ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ จำเป็นต้องจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ ไม่ควรเรียกใช้งานผ่านระบบเครือข่าย และไม่ควรเคลื่อนย้ายตำแหน่งไฟล์ หลังจากที่ได้สร้างโครงการด้วยแบบจำลอง ArcSWAT แล้ว เนื่องจากจะทำให้เกิดความผิดพลาดในขณะใช้งานได้

1.2.1.1 การเตรียมข้อมูลชนิดแผนที่

(1) Digital Elevation Model (DEM) ไฟล์กริดเซลล์ แสดงค่าระดับความสูงต่ำภูมิประเทศของพื้นที่โครงการโดยค่าระดับความสูงของภูมิประเทศ (DEM) อาจจะเป็นจำนวนเต็มหรือทศนิยมก็ได้ แต่จะต้องเป็นหน่วยใดหน่วยหนึ่งในบรรดา เมตร, เซนติเมตร, หลา, ฟุต หรือนิ้ว

(2) Land Cover/Land Use ไฟล์กริดเซลล์หรือรูปทรงโพลีกอน แสดงแผนที่การใช้ที่ดิน ซึ่งจะต้องมีอธิบาย (Attribute) ที่สามารถนำไปใช้ในการ Reclassify ให้เข้ากับชุดฐานข้อมูลของ ArcSWAT สำหรับพื้นที่ในประเทศไทยผู้ใช้งานจะต้องจัดทำตารางเชื่อมโยงข้อมูลกับแผนที่การใช้ที่ดิน

(3) Soil ไฟล์กริดเซลล์หรือรูปทรงโพลีกอน แสดงแผนที่ชนิดดิน ซึ่งจะต้องมีอธิบาย (Attribute) ที่สามารถนำไปใช้ในการ Reclassify ให้เข้ากับชุดฐานข้อมูลของ ArcSWAT สำหรับพื้นที่ในประเทศไทย ผู้ใช้งานจะต้องจัดทำตารางเชื่อมโยงข้อมูลกับแผนที่ชนิดดิน

1.2.1.2 การเตรียมข้อมูลชนิดชั้นข้อมูล

(1) ชั้นข้อมูลขอบเขตลุ่มน้ำ ทั้งนี้สามารถใช้งานได้ทั้งไฟล์กริดเซลล์หรือรูปทรงโพลีกอน แสดงขอบเขตพื้นที่ศึกษา ซึ่งจะถูกนำไปซ้อนทับกับไฟล์ข้อมูล DEM เพื่อกำหนดให้กริดเซลล์ที่อยู่นอกพื้นที่ศึกษามีค่าเป็น “No Data” ซึ่งโปรแกรมก็จะไม่นำกริดเซลล์นั้นไปใช้ในการคำนวณ

(2) ชั้นข้อมูลเส้นลำน้ำ โดยไฟล์ของข้อมูลเส้นลำน้ำจะอยู่ในรูปของเส้นโพลีลาย แสดงเส้นลำน้ำ ที่จะนำไปซ้อนทับลงบนไฟล์ข้อมูล Dem เพื่อกำหนดกริดเซลล์ที่เป็นลำน้ำ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นที่ราบ ที่เป็นโปรแกรมไม่สามารถคำนวณหาทิศทางการไหลได้จากข้อมูลภูมิประเทศ

1.2.1.3 การเตรียมข้อมูลชนิดตารางหรือไฟล์ข้อความ

(1) ตารางเชื่อมโยงข้อมูลของแผนที่การใช้ที่ดิน (Land Use Lookup Table) ใช้ในการ Reclassify แผนที่การใช้ที่ดินให้มีรหัสการใช้ที่ดินสอดคล้องกับฐานข้อมูล ArcSWAT ตารางเชื่อมโยงจะต้องมีรูปแบบดังนี้

VALUE	LANDUSE
1	AGRL
2	AGRR
3	CSIL
4	FRSD
5	FRSE
6	ABRN
7	WATR
...	...

โดย

VALUE รหัสของหน่วยการใช้ที่ดิน

LANDUSE รหัสการใช้ที่ดินสอดคล้องตามฐานข้อมูล

SWAT

2) ตารางเชื่อมโยงข้อมูลของแผนที่ชนิดดิน (Soil Lookup Table) ใช้ในการ Reclassify แผนที่ชนิดดินให้มีรหัสชนิดดินสอดคล้องกับฐานข้อมูล ArcSWAT ตารางเชื่อมโยงจะต้องมีรูปแบบดังนี้

VALUE	NAME
1	Ag
2	Af
3	Alp
4	Bg
...	...

โดย

VALUE รหัสของหน่วยการใช้ที่ดิน

NAME รหัสชนิดดินสอดคล้องตามฐานข้อมูล SWAT

3) รายชื่อและตำแหน่งสถานีวัดภูมิอากาศ (Weather Gage Location Table) โดยต้องจัดเตรียมไฟล์ตารางในรูปแบบข้อความ (*.txt) ข้อมูลภูมิอากาศที่ใช้ ประกอบด้วย ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด – ต่ำสุด ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ข้อมูลความเร็วลม และข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ รูปแบบของข้อมูลดังนี้

ID,NAME,LAT,LONG,ELEVATION

1,tmp161200,17.10,101.23,185

2,tmp161201,16.60,101.24,197

3,tmp161202,16.90,101.25,192

4,tmp161203,17.20,101.26,183

โดย ID ลำดับสถานี

NAME ชื่อสถานี

LAT ตำแหน่งละติจูด

LONG ตำแหน่งลองจิจูด

ELEV ระดับความสูงของสถานี

4) รายชื่อและตำแหน่งสถานีวัดน้ำฝน (Precipitation Gage Location Table) โดยต้องจัดเตรียมไฟล์ตารางในรูปแบบข้อความ (*.txt) ดังนี้

ID,NAME,LAT,LONG,ELEVATION

1,PCP_161200,17.10,101.23,185

2,PCP_161201,16.60,101.24,197

3,PCP_161202,16.90,101.25,192

4,PCP_161203,17.20,101.26,183

โดย ID ลำดับสถานี

NAME ชื่อสถานี

LAT ตำแหน่งละติจูด

LONG ตำแหน่งลองจิจูด

ELEV ระดับความสูงของสถานี

(5) ข้อมูลฝนและภูมิอากาศรายวัน (Precipitation & Weather Data) ข้อมูลต้องจัดเตรียมในรูปแบบข้อความ (*.txt) โดยบรรทัดแรกแสดงวันเวลาเริ่มต้นของข้อมูล (YYYYMMDD) และในบรรทัดต่อไปจะเก็บข้อมูลรายวันของชุดข้อมูลนั้น

20000101
1.0
0.5
0.6
1.5
0.8
0.7
2.0
2.4
1.7
15.0
14.1

1.2.1.4 การเตรียมข้อมูลพื้นฐาน (Database)

ผู้ใช้อต้องเตรียมข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่ศึกษาโดยใส่ไว้ในส่วนของไฟล์ SWAT2012.DBF ซึ่งภายในบรรจุข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการรันแบบจำลอง ข้อมูลหลักที่ผู้ใช้อต้องเพิ่มเติมในกรณีไม่ได้ อยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แก่ ข้อมูลชนิดพืชรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้อง (crop) ข้อมูลชนิดดินรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้อง (usersoil) ข้อมูลค่าเฉลี่ยระยะยาวของภูมิอากาศของสถานี ภูมิอากาศในพื้นที่ (WGEN_user) เพื่อให้มีฐานข้อมูลตามพื้นที่จริง ดังนี้

- 1) ข้อมูลชนิดพืชรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้อง (crop)
- 2) ข้อมูลชนิดดินรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้อง (usersoil)
- 3) ข้อมูลค่าเฉลี่ยระยะยาวของภูมิอากาศของสถานีภูมิอากาศในพื้นที่ (WGEN_user)

1) ข้อมูลชนิดพืชรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้อง (crop)

OBJECTID	ICNUM	CPNM	IDC	CROPNAME	BIO_E	HVSTI	BLAI	FRGRW1	LAIMX1	FRGRW2	LAIMX2	D
1	1	AGRL	4	Agricultural Land-Generc	33.5	.45	3	.15	.05	.5	.95	
2	2	AGRR	4	Agricultural Land-Row Crops	39	.5	3	.15	.05	.5	.95	
3	3	AGRC	5	Agricultural Land-Close-grown	30	.4	4	.05	.05	.45	.95	
4	4	ORCD	7	Orchard	15	.1	4	.1	.15	.5	.75	
5	5	HAY	6	Hay	35	.9	4	.05	.05	.49	.95	
6	6	FRST	7	Forest-Mixed	15	.76	5	.05	.05	.4	.95	
7	7	FRSD	7	Forest-Deciduous	15	.76	5	.05	.05	.4	.95	
8	8	FRSE	7	Forest-Evergreen	15	.76	5	.15	.7	.25	.99	
9	9	WETL	6	Wetlands-Mixed	47	.9	6	.1	.2	.2	.95	
10	10	WETF	7	Wetlands-Forested	15	.76	5	.05	.05	.4	.95	
11	11	WETN	6	Wetlands-Non-Forested	47	.9	6	.1	.2	.2	.95	
12	12	PAST	6	Pasture	35	.9	4	.05	.05	.49	.95	
13	13	SPAS	6	Summer Pasture	35	.9	4	.05	.05	.49	.95	
14	14	WPAS	6	Winter Pasture	30	.9	4	.15	.01	.5	.95	
15	15	RNGE	6	Range-Grasses	34	.9	2.5	.05	.1	.25	.7	
16	16	RNGB	6	Range-Brush	34	.9	2	.05	.1	.25	.7	
17	17	SWRN	6	Southwestern US (Arid) Range	34	.9	1.5	.05	.1	.25	.7	
18	18	WATR	6	Water	0	0	0	0	0	0	0	
19	19	CORN	4	Corn	39	.5	6	.15	.05	.5	.95	
20	20	CSIL	4	Corn Silage	39	.9	4	.15	.05	.5	.95	
21	21	SCRN	4	Sweet Corn	39	.5	2.5	.15	.05	.5	.95	
22	22	EGAM	6	Eastern Gamagrass	21	.9	2.5	.05	.18	.25	.9	
23	23	GRSG	4	Grain Sorghum	33.5	.45	3	.15	.05	.5	.95	

2) ข้อมูลชนิดดินรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้อง (usersoil)

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	SSID	CMPPCT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXC	SOL_CRK
1	M001	0	ACf	0	100	4	B	2000	1	0 L
2	M002	0	ACf/ACH	0	100	4	B	2000	1	0 L
3	M003	0	ACf/ACP	0	100	4	B	2000	1	0 L
4	M004	0	ACf/CMd	0	100	4	B	2000	1	0 L
5	M005	0	ACf/LPd	0	100	4	B	2000	1	0 L
6	M006	0	ACf-C	0	100	4	B	2000	1	0 L
7	M007	0	ACf-CH	0	100	4	B	2000	1	0 S
8	M008	0	ACfj	0	100	4	B	2000	1	0 L
9	M009	0	ACf-M	0	100	3	B	1000	1	0 L
10	M010	0	ACg	0	100	4	C	2000	1	0 C
11	M011	0	ACg/ACH	0	100	4	C	2000	1	0 C
12	M012	0	ACg/ACP	0	100	4	C	2000	1	0 C
13	M013	0	ACg/ACpg	0	100	4	C	2000	1	0 C
14	M014	0	ACg/ACpg-C	0	100	4	C	2000	1	0 C
15	M015	0	ACg/ARa	0	100	4	C	2000	1	0 C
16	M016	0	ACg/CMd	0	100	4	C	2000	1	0 C
17	M017	0	ACg/LVg	0	100	4	C	2000	1	0 C
18	M018	0	ACg/LXg	0	100	4	C	2000	1	0 C
19	M019	0	ACg/PLd	0	100	4	C	2000	1	0 C
20	M020	0	ACg/SNg-Z	0	100	4	C	2000	1	0 C
21	M021	0	ACga	0	100	4	C	2000	1	0 L
22	M022	0	ACg-C	0	100	4	C	2000	1	0 L

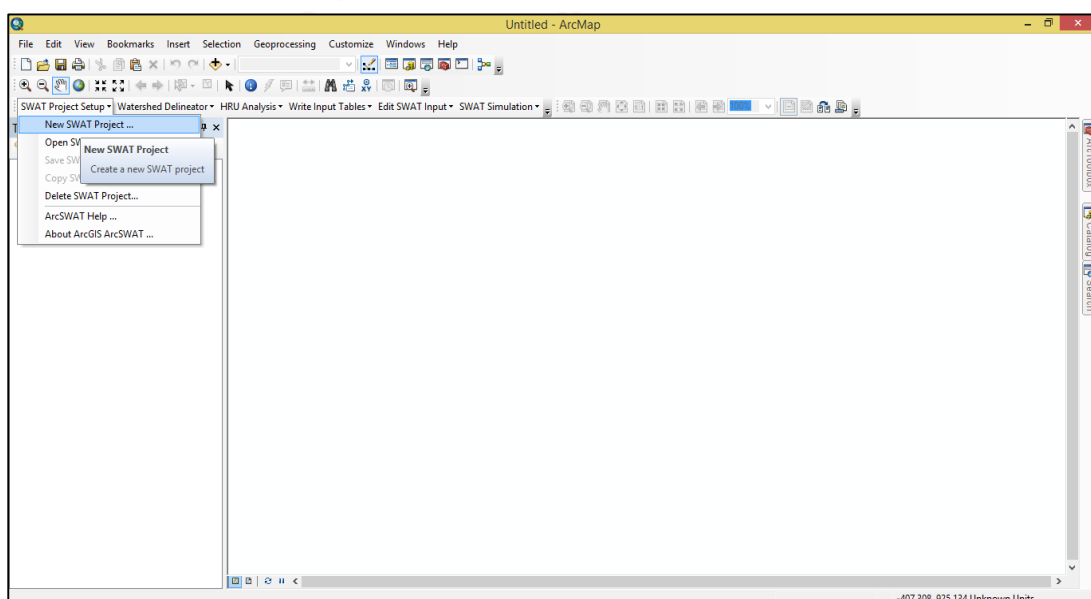
3) ข้อมูลค่าเฉลี่ยระยะยาวของภูมิอากาศของสถานีภูมิอากาศในพื้นที่ (WGEN_user)

OBJECTID	STATION	WLATITUDE	WLONGITUDE	WELEV	RAIN_YRS	TMPMX1	TMPMX2	TMPMX3	TMPMX4	TMPMX5
1	Sample	33.65	-95.69	179.8	83	11.9	13.9	18.8	23.6	27.6
2	wea62	33.03	-95.92	179.8	10	11.68	13.94	18.82	23.62	27.61
4	wea43	33.25	-95.78	179.8	10	11.68	13.94	18.82	23.62	27.61
21	wea80	33.45	-95.55	179.8	10	11.68	13.94	18.82	23.62	27.61
54	Chgsenwgn	20.27	100.1	369	24	28.29973	31.08392	34.37873	36.37361	35.11935
55	RoiEtwgn	16.05	103.68	140	24	30.57716	32.45549	34.55976	35.68535	34.17871
56	Surinwgn	14.88	103.48	145	24	31.37429	33.31106	35.22789	35.93411	34.37896
57	SiemRwgn	13.37	103.83	15	24	30	32.9	34	34.6	33.4
58	Denqenwgn	28.5	98.9	3488	24	1.940054	3.546608	6.845161	10.64194	14.71949
59	Qamdowgn	31.15	87.11	3307	24	8.511828	10.17566	13.18051	16.40708	20.49691
60	Simaoowgn	22.67	101.4	1303	24	21.09476	23.07906	26.28347	28.36625	27.8578
61	Chgsenwgn	20.27	100.1	369	24	28.29973	31.08392	34.37873	36.37361	35.11935
62	Luangwgn	19.88	102.31	999	24	28.51761	31.14159	33.62688	34.86722	33.55148
63	Vientwgn	17.95	102.52	170	24	29.74589	31.89713	33.93914	33.68554	32.57456
64	Senowgn	16.67	105	184	24	32.5	32.11298	32.31062	32.23514	32.25229
65	Nakhonwgn	17.5	104.33	140	24	28.82258	30.47345	33.17742	34.69861	33.01479
66	Paksewgn	15.12	105.78	93	24	33.12191	32.25767	31.57876	31.87222	32.26868
67	RoiEtwgn	16.05	103.68	140	24	30.57716	32.45549	34.55976	35.68535	34.17871

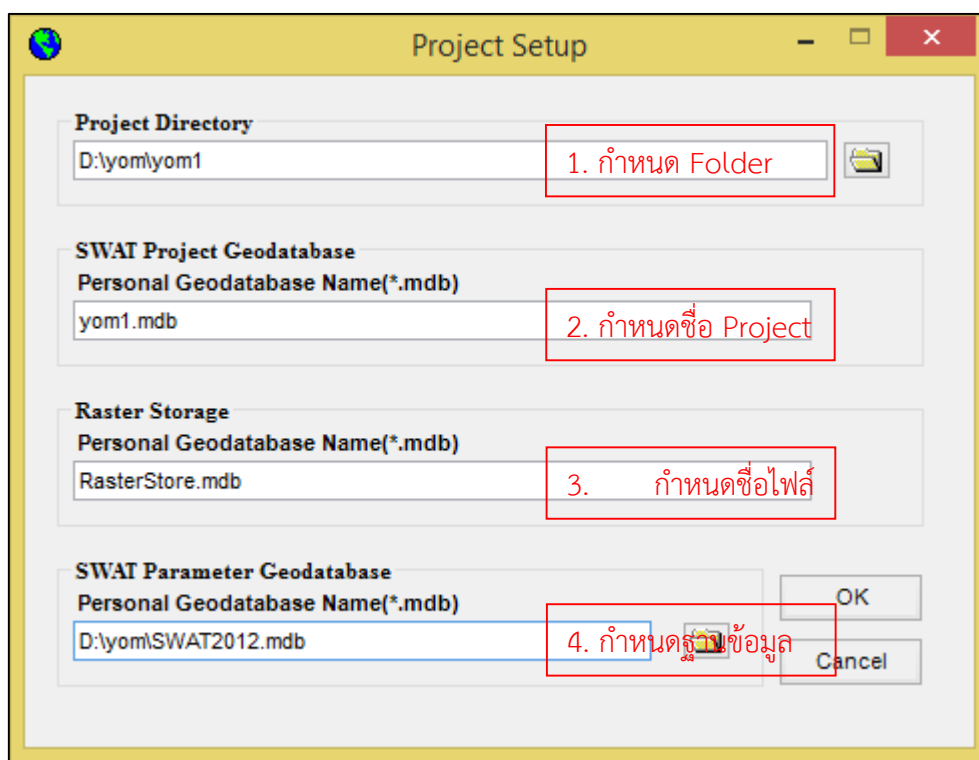
1.2.2 การเข้าสู่โปรแกรม ArcSWAT

เปิดโปรแกรม ArcGIS 10.3 และเปิดโปรแกรมเสริม ArcSWAT ทั้งนี้สามารถสร้างโครงการใหม่โดยการ New Project หรือ Open Project เพื่อเปิดโครงการที่มีอยู่เดิมแล้ว กรณีสร้างโครงการใหม่ ArcSWAT จะแจ้งให้ผู้ใช้กำหนดชื่อโครงการใหม่ และระบุตำแหน่งแฟ้มข้อมูลของโครงการที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ขั้นตอนการสร้าง New Project โดยคลิกที่ SWAT Project Setup และเลือก New SWAT Project



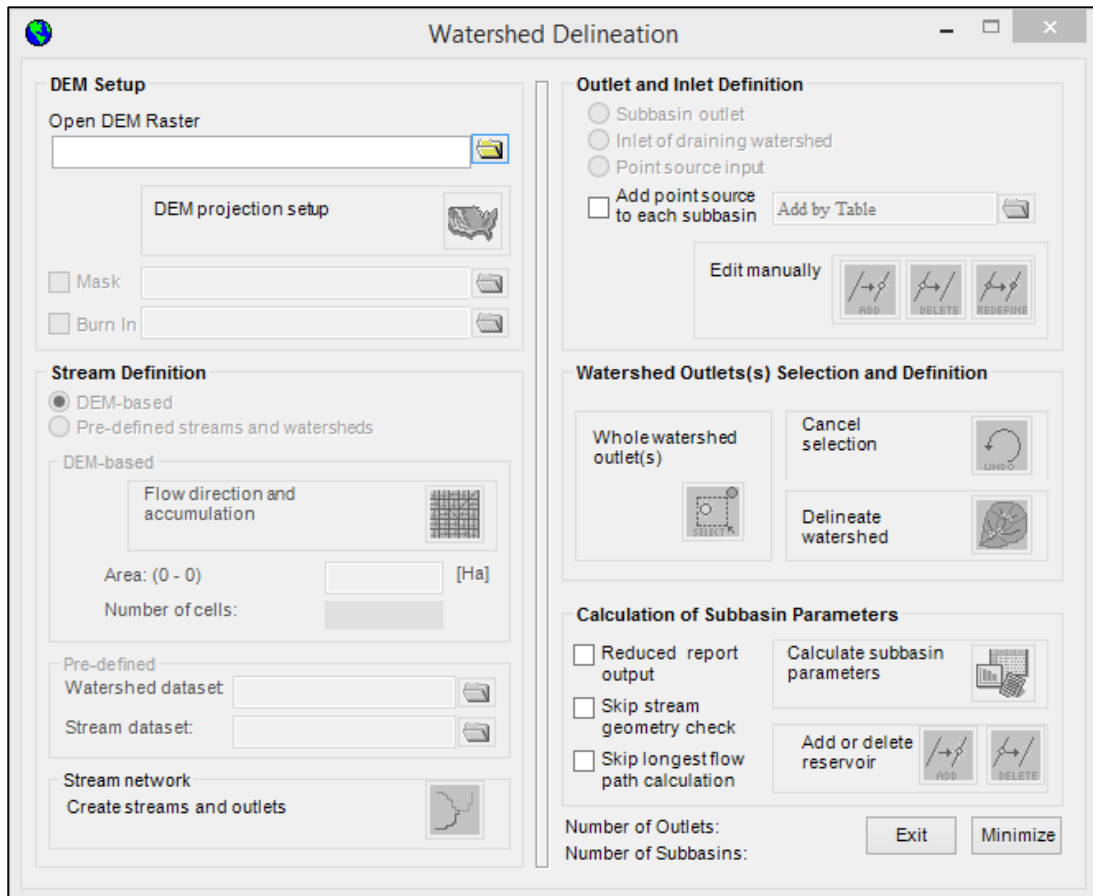
2) ขั้นตอนการตั้งชื่อ Project และเลือกไฟล์ Database เพื่อเชื่อมต่อกับ Project



ขั้นตอนการตั้งชื่อ Project และเลือกไฟล์ Database เพื่อเชื่อมต่อกับ Project

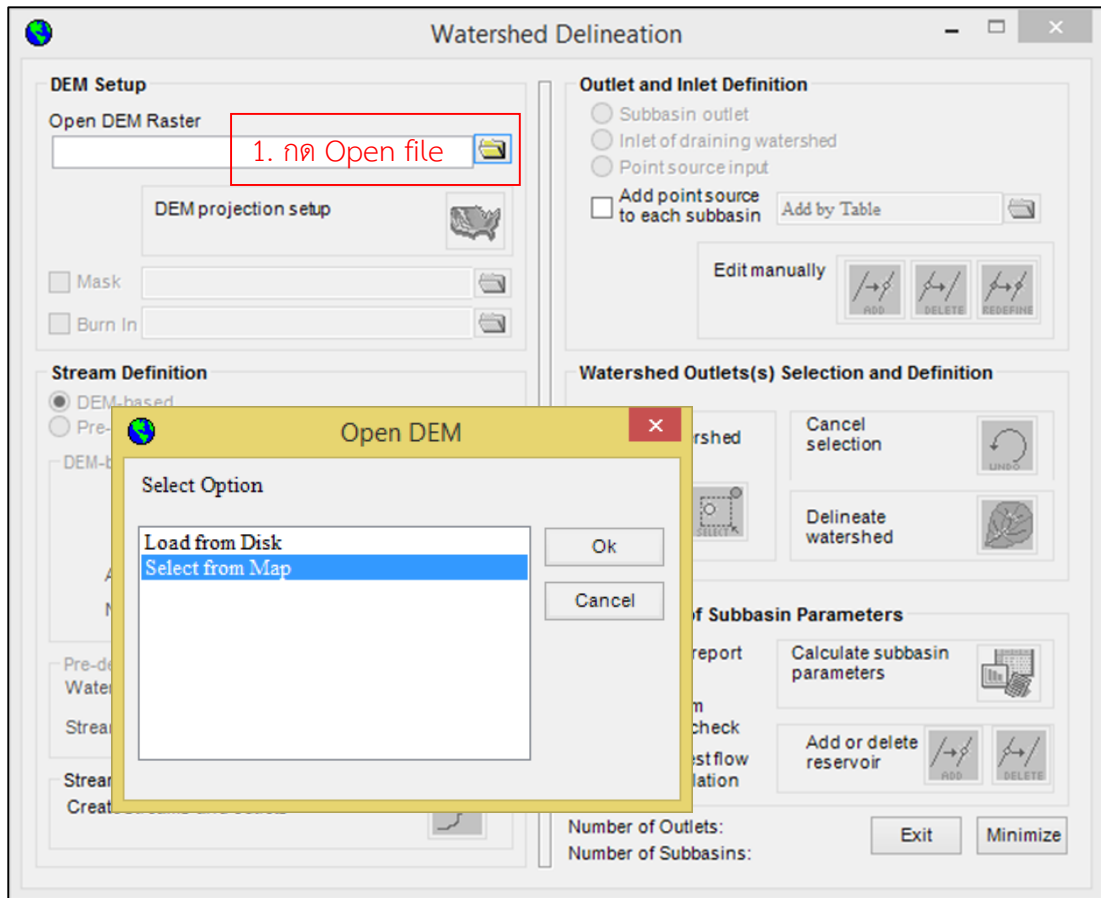
1.2.3 การกำหนดพื้นที่ลุ่มน้ำ

เมื่อสร้างโครงการใหม่เสร็จแล้ว โปรแกรมจะเปิด Watershed Delineation โดยอัตโนมัติ สำหรับกรณีที่เปิดโปรแกรมโครงการเดิมขึ้นมาเพื่อแก้ไข ผู้ใช้สามารถเรียกหน้าต่าง Watershed Delineation โดยการเลือกคำสั่ง Automatic Watershed Delineation ในเมนูบาร์ของโปรแกรม ArcGIS



1) ขั้นตอน DEM Set Up

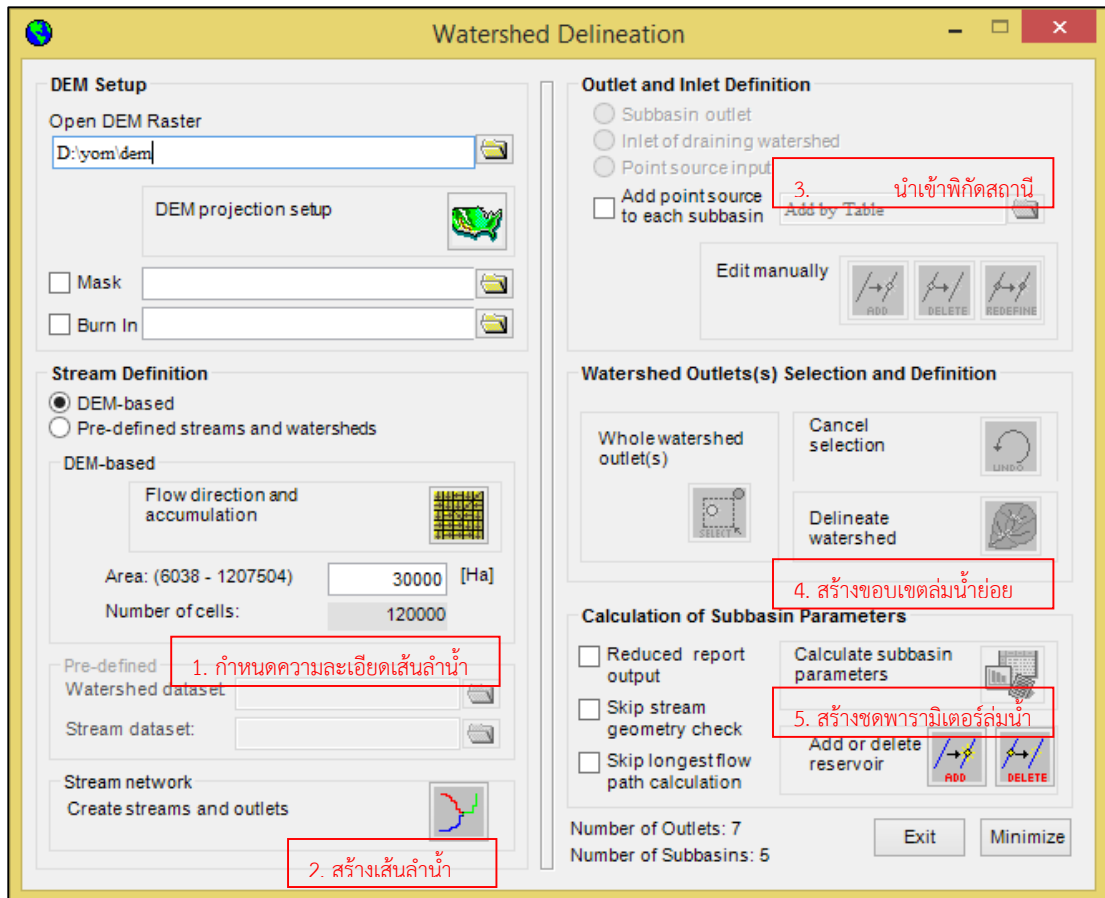
หลังจากเปิดหน้าต่าง Watershed Delineation แล้ว ให้ทำการกดปุ่ม Open file เพื่อทำการเพิ่ม DEM Grid ในช่อง DEM Set Up เพื่อกำหนดตำแหน่งของไฟล์ข้อมูลระดับสูงต่ำของภูมิประเทศพื้นที่ศึกษา (Digital Elevation Map) ผู้ใช้ต้องกำหนด Projection และระบหน่วยของความสูงด้วย ข้อมูลขอบเขตพื้นที่ในรูปแบบกริดไฟล์ สามารถเพิ่มในส่วนของ Mask ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการขั้นตอนนี้ รวมถึงข้อมูลเส้นลำน้ำ (ถ้ามี) สามารถระบุใน Burn In ซึ่งมีประโยชน์ในกรณีที่บางส่วนของลำน้ำในพื้นที่ศึกษาไม่ได้ไหลตามระดับความสูงหรือไหลไปทิศทางที่ไม่สอดคล้องกัน



2) ขั้นตอนการกำหนดเส้นลำน้ำ (Stream Definition)

ในการกำหนดเส้นลำน้ำ มี 2 ทางเลือก ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่มี ได้แก่ วิธีแรก ใช้ข้อมูล DEM ในการคำนวณเส้นทางการไหลในลำน้ำ โดยสามารถกำหนดความละเอียดของเส้นลำน้ำมากน้อยได้ตามต้องการ โดยเติมข้อมูลในช่อง Area(Ha) ทั้งนี้ค่าที่ระบบสามารถใส่ค่าที่มีค่าต่ำกว่าค่าคะแนนต่ำสุด เพื่อให้ได้เส้นแม่น้ำที่ละเอียดมากขึ้น วิธีที่สอง ใช้ขอบเขตลุ่มน้ำย่อยและเส้นลำน้ำที่กำหนดไว้แล้ว โดยต้องระบุที่เก็บไฟล์ในช่อง Watershed Dataset เพื่อเลือกไฟล์ที่แสดงขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย และคลิกที่ช่อง Stream Dataset เพื่อเลือกไฟล์ที่แสดงเส้นลำน้ำ

เมื่อกำหนดข้อมูลเส้นลำน้ำแล้ว กดปุ่ม Create streams and Outlet เพื่อให้โปรแกรมทำการประมวลผลข้อมูล DEM ประกอบด้วย การคำนวณทิศทางการไหลของน้ำสำหรับแต่ละกริด และการกำหนดพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นแอ่งต่ำ - หนอง (Sink) เพื่อสร้างเส้นลำน้ำ และสามารถย้อนกลับในขั้นตอนการกำหนดเส้นลำน้ำเพื่อแก้ไขความละเอียดของเส้นลำน้ำได้

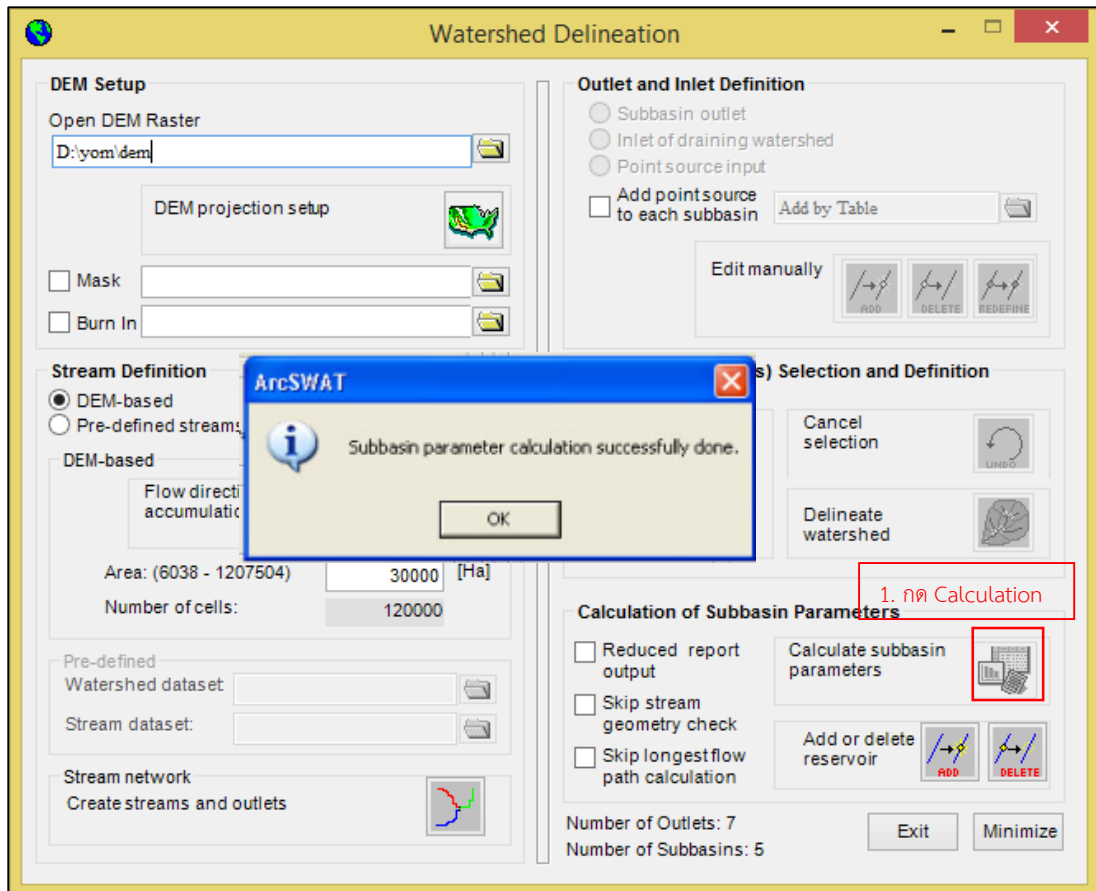


3) ขั้นตอนการกำหนดจุดออกและจุดที่สำคัญในพื้นที่

ในขั้นตอนนี้สามารถกำหนดจุดออกของแต่ละลุ่มน้ำย่อย, ตำแหน่งอ่างเก็บน้ำ, จุดน้ำเข้าจากลุ่มน้ำอื่นจุดต่างๆเหล่านี้ สามารถเตรียมข้อมูลในรูปแบบของตาราง (*.dbf) หรือกำหนดตำแหน่งด้วยการคลิกลงที่ละจุด

4) ขั้นตอนการกำหนด Main Watershed และการคำนวณพารามิเตอร์

การกำหนดจุดปลายสุดลำน้ำของพื้นที่ศึกษาโดยกดปุ่ม Select เพื่อเลือกจุดออกที่ต้องการกำหนดให้เป็นจุดปลายสุดของลำน้ำ โปรแกรมจะทำการสร้างขอบเขตลุ่มน้ำหลักของจุดปลายสุดของลำน้ำ และขอบเขตลุ่มน้ำย่อยของจุดออกต่างๆ ที่อยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำหลัก



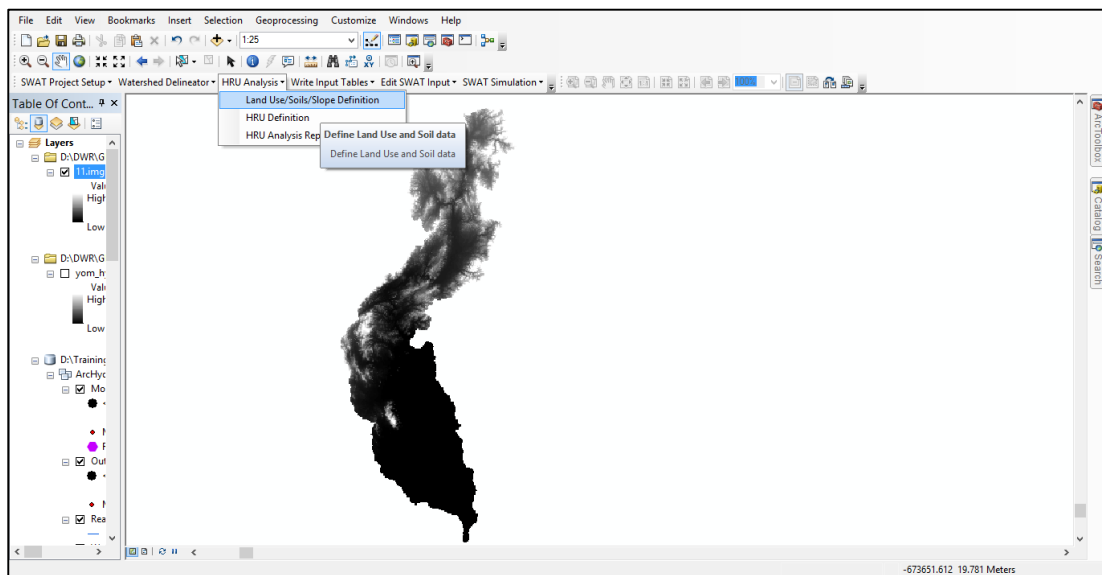
เมื่อพิจารณาขอบเขตลุ่มน้ำหลัก และลุ่มน้ำย่อยที่โปรแกรมสร้างขึ้น แล้วพบว่าถูกต้องตรงตามความต้องการดีแล้ว ให้กดปุ่ม Apply ในช่อง Main Watershed เพื่อสั่งให้โปรแกรมคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของพื้นที่ลุ่มน้ำที่จำเป็นต้องใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลอง SWAT ได้แก่ ขนาดพื้นที่รับน้ำ ความลาดชันความยาวลำน้ำ ความกว้างลำน้ำ ความลึกลำน้ำ และตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง

กรณีในพื้นที่โครงการมีอ่างเก็บน้ำ ผู้ใช้ก็สามารถกำหนดตำแหน่งที่ตั้งเขื่อนได้ โดยกดปุ่ม Add ในช่อง Reservoir ซึ่งโปรแกรมจะให้ผู้ใช้กำหนดตำแหน่งของเขื่อนด้วยมือผ่านทางหน้าจอของ Watershed View โดยตรง

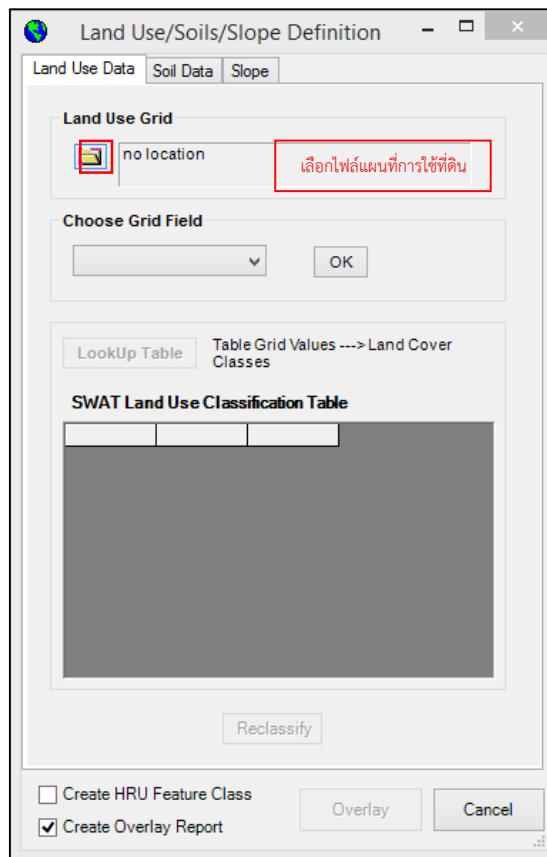
1.2.4 การกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Unit-HRU)

1) Land use

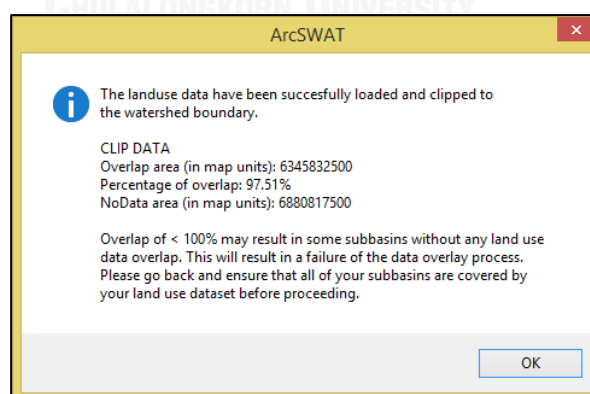
โปรแกรมจะทำการกำหนด HRUs จากข้อมูล Land use, Soil, Slopes ผ่านเมนู Definition of Land Use and Soil Themes โดยเลือก Land use / Soil / Slopes Definition ภายใต้เมนู HRU Analysis เพื่อนำเข้าแผนที่การใช้ที่ดิน



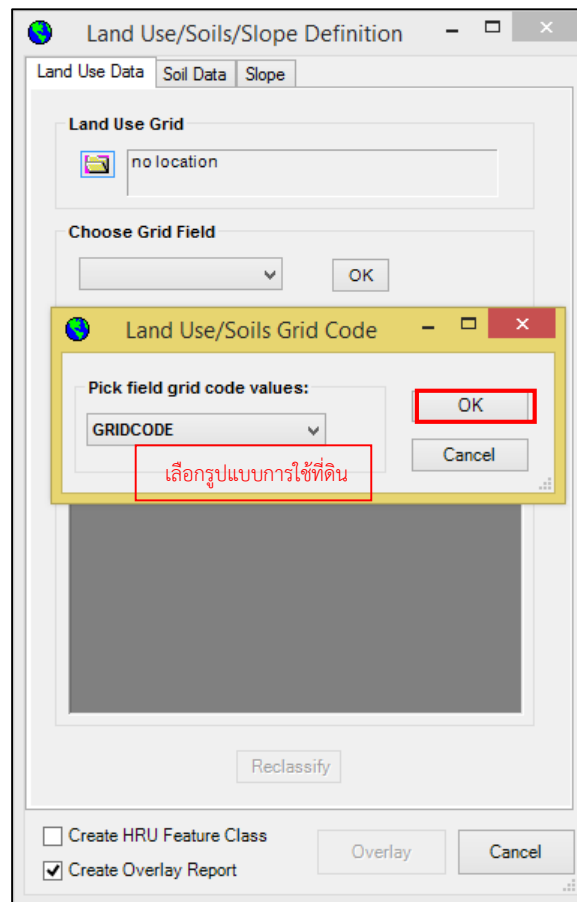
นำเข้าข้อมูลแผนที่การใช้ที่ดิน โดยการกดปุ่มในช่อง Land Use Grid จากนั้นเลือกชื่อไฟล์แผนที่การใช้ที่ดินของพื้นที่ลุ่มน้ำ แล้วกำหนด Field ที่เป็นรหัสประเภทการใช้ที่ดิน



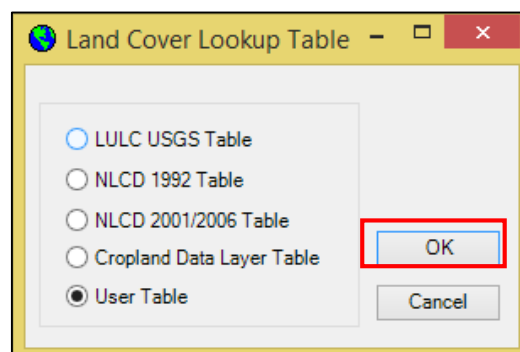
เลือกประเภทรหัสที่ดินโดยใช้ Grid Code โดยจะต้องกำหนดรหัสการใช้ที่ดินแต่ละประเภทให้สอดคล้องกับฐานข้อมูลประเภทการใช้ที่ดินของโปรแกรม SWAT



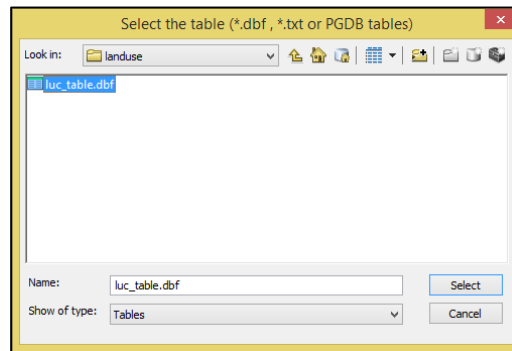
เมื่อนำเข้าข้อมูล Land use โปรแกรมจะนำเข้าข้อมูล เพื่อซ้อนทับกับ Dem ในที่นี้ พบว่าข้อมูลมีการซ้อนทับ 97.51 %



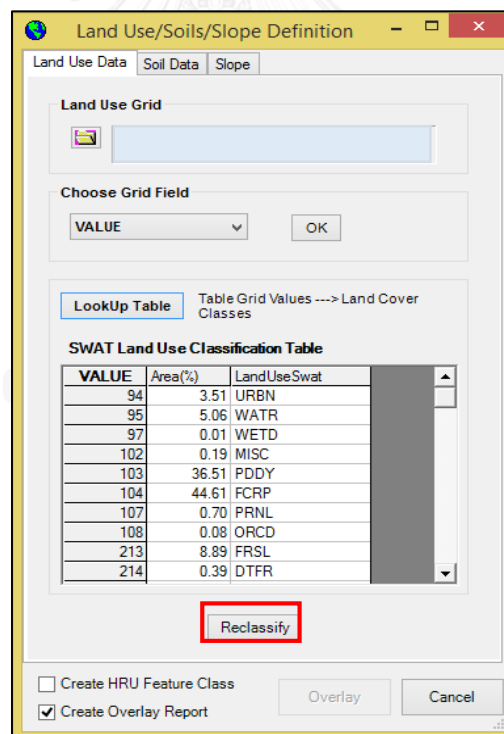
เมื่อทำการกำหนดการนำเข้ารูปแบบประเภทการใช้ที่ดิน แบบ Grid Code ให้ทำการกดตกลง จากนั้นให้ทำการเลือก Lookup Table Grid Value โดยเลือกจาก User Table



เลือกการนำเข้า Land Use Code โดยคลิกที่ประเภทผู้ใช้งานกำหนดเอง User Table และกดตกลง หลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง Select The Table โดยอัตโนมัติ เพื่อเลือกไฟล์ Land Use Table

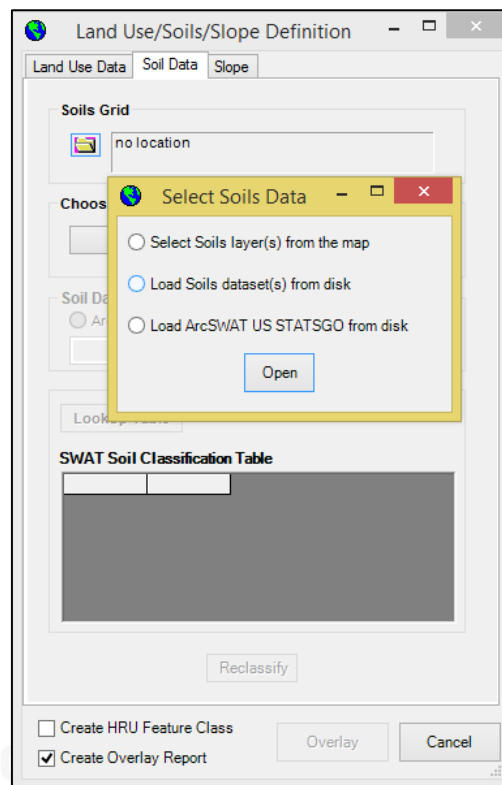


เมื่อนำเข้าตารางรูปแบบการใช้ที่ดินแล้ว คลิก Select หลังจากนั้นสัญลักษณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินจะแสดงใน SWAT Landuse Classification Table หลังจากนั้นให้ทำการกดปุ่ม Reclassify

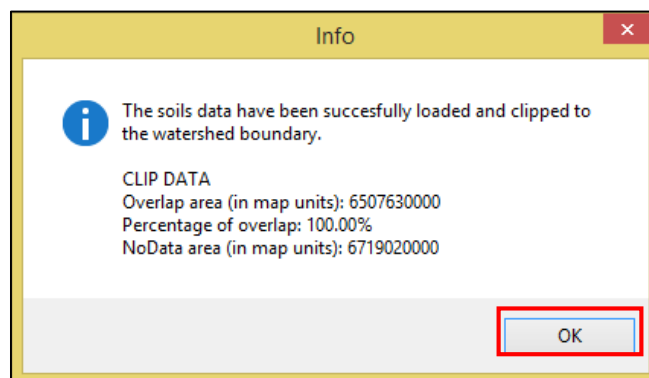


2) Soil Data

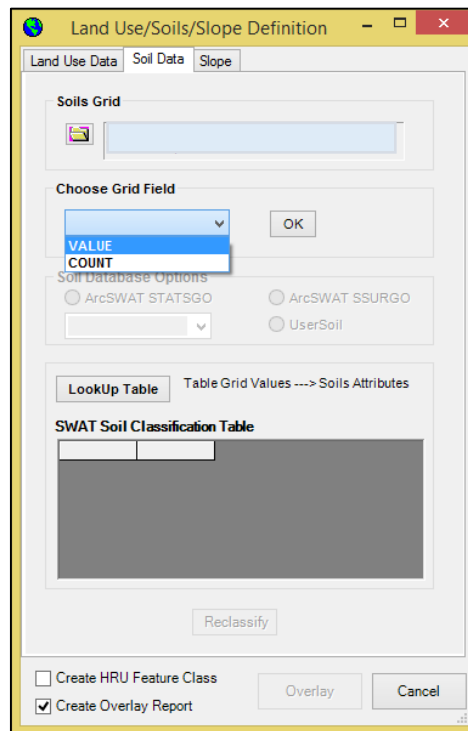
โปรแกรมจะทำการกำหนด HRUs จากข้อมูล Land use, Soil, Slopes ผ่านเมนู Definition of Land Use and Soil Themes โดยเลือกที่แถบ Soil Data ภายใต้เมนู HRU Analysis เพื่อนำเข้าแผนที่ชนิดดินนำเข้าข้อมูลแผนที่ชนิดดิน โดยการกดปุ่มในช่อง Soil Grid จากนั้นเลือกชื่อไฟล์แผนที่ชนิดดินของพื้นที่ลุ่มน้ำ แล้วกำหนด Field ที่เป็นรหัสประเภทชนิดดิน



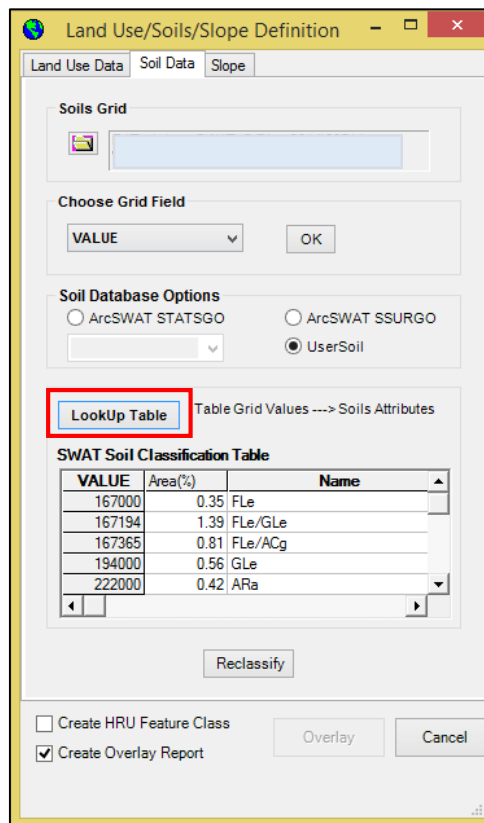
เลือกประเภทรหัสที่ดินโดยใช้ Name Code โดยจะต้องกำหนดรหัสการใช้ที่ดินแต่ละประเภทให้สอดคล้องกับฐานข้อมูลประเภทการใช้ที่ดินของโปรแกรม SWAT



เมื่อนำเข้าข้อมูล Soil Data โปรแกรมจะนำเข้าข้อมูล เพื่อซ้อนทับกับ Dem และ Landuse ในครั้งนี้พบว่า ข้อมูลมีการซ้อนทับ 100.00 % ถือว่าข้อมูลซ้อนทับสมบูรณ์



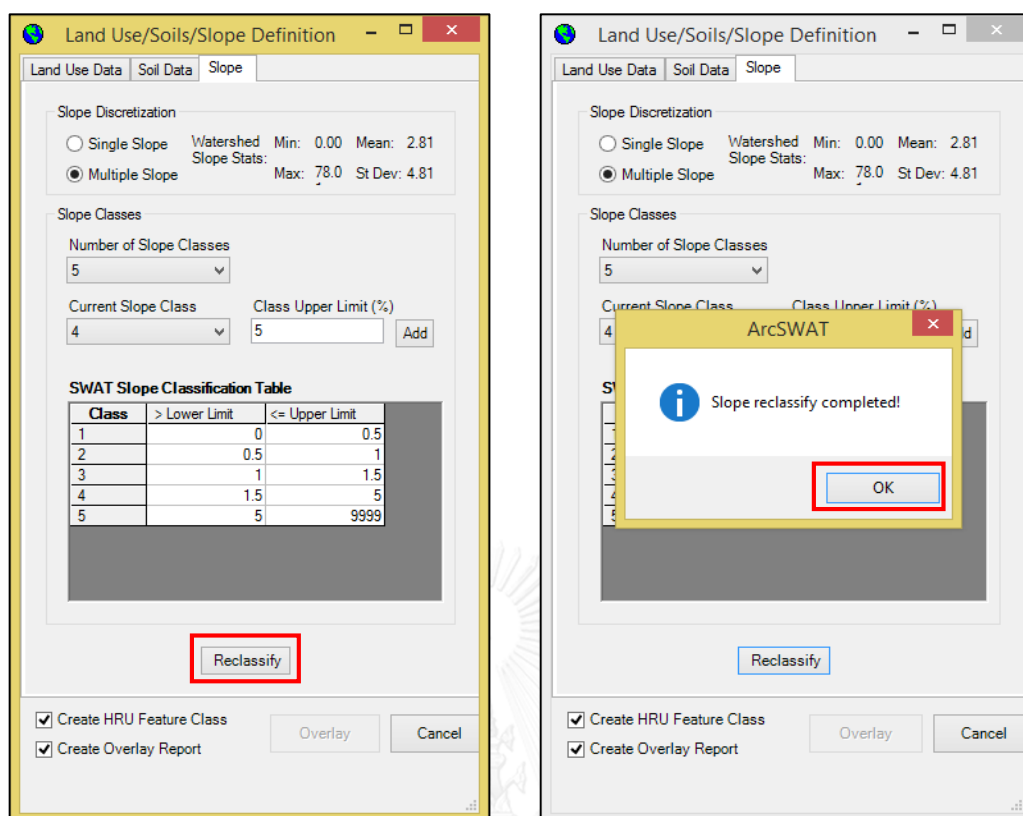
เมื่อทำการกำหนดการนำเข้ารูปแบบชนิดดิน ในช่อง Choose Grid Field เลือก Value และทำการกด OK จากนั้นให้ทำการเลือก Soil Database Options จากตาราง UserSoil และเลือก LookUp Table เพื่อนำเข้าชนิดดินจากผู้ใช้งานกำหนดเอง



เมื่อชนิดดินที่กำหนดมาปรากฏที่ SWAT Soil Classification Table ให้กด Reclassify

3) Slope

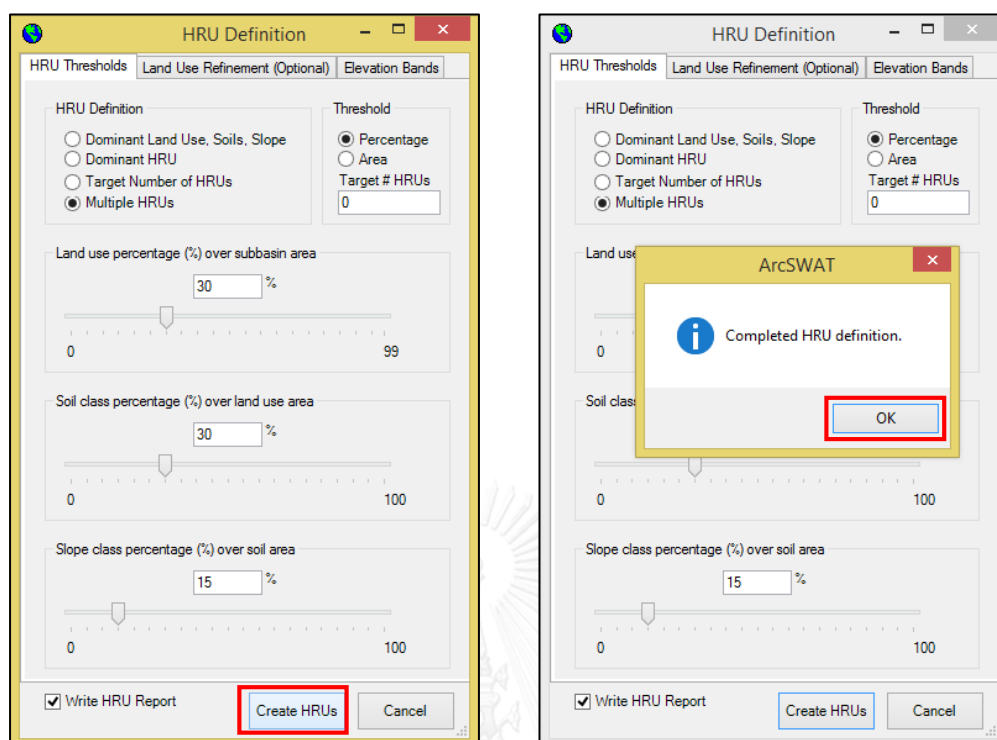
การตั้งค่าความลาดชันของพื้นที่ สามารถเลือก Single Slope หากพื้นที่ส่วนใหญ่มีระดับความสูงใกล้เคียงกัน หรือกำหนดเป็นแบบแบ่งช่วงความสูง โดยเลือกแบบ Multiple Slope จากนั้นทำการ Reclassify หน้าต่าง Watershed View จะปรากฏ Themes ชื่อ Slope Class จากนั้นให้ทำการกด Overlay ก็จะมีขึ้นในส่วนขั้นตอนนี้



4) การกำหนด Hydrologic Response Units Distribution

ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดเงื่อนไขการสร้างหน่วยการตอบสนองทางอุทกวิทยาของแต่ละลุ่มน้ำย่อย ให้สอดคล้องตามการแพร่กระจายลักษณะการใช้ที่ดิน ชนิดของดิน และความลาดชันในพื้นที่ โดยเลือกคำสั่ง HRUs Definition จากเมนู ArcSWAT โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างให้กำหนดรูปแบบ HRU ที่ต้องการ ซึ่งมี 3 ทางเลือก คือ

- Dominant Land Use, Soil, Slope เป็นการกำหนดให้แต่ละลุ่มน้ำย่อยมี HRU เพียงแบบเดียว
- Dominant HRU เป็นการกำหนดให้ทุกลุ่มน้ำมีค่า HRU เพียงแบบเดียว
- Multiple Hydrologic Response Units เป็นการกำหนดให้แต่ละลุ่มน้ำย่อยมี HRUs สอดคล้องตามเปอร์เซ็นต์ของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดดิน และความลาดชัน ตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนดให้ Land use % over subbasin area = 30% , Soil class % over land use area = 30% และ Slope class % over soil area = 15% โปรแกรมจะทำการแบ่งทุกๆพื้นที่ของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยที่มีค่าการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ที่มีค่าตั้งแต่ 30% ของพื้นที่ ชนิดของดินที่มีค่าตั้งแต่ 10% ของการใช้ประโยชน์ที่ดิน และ ความลาดชันที่มีพื้นที่มากกว่า 15 % ของชนิดดินขึ้นไปตามลำดับ ให้เป็น 1 HRUs ภายในแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำ

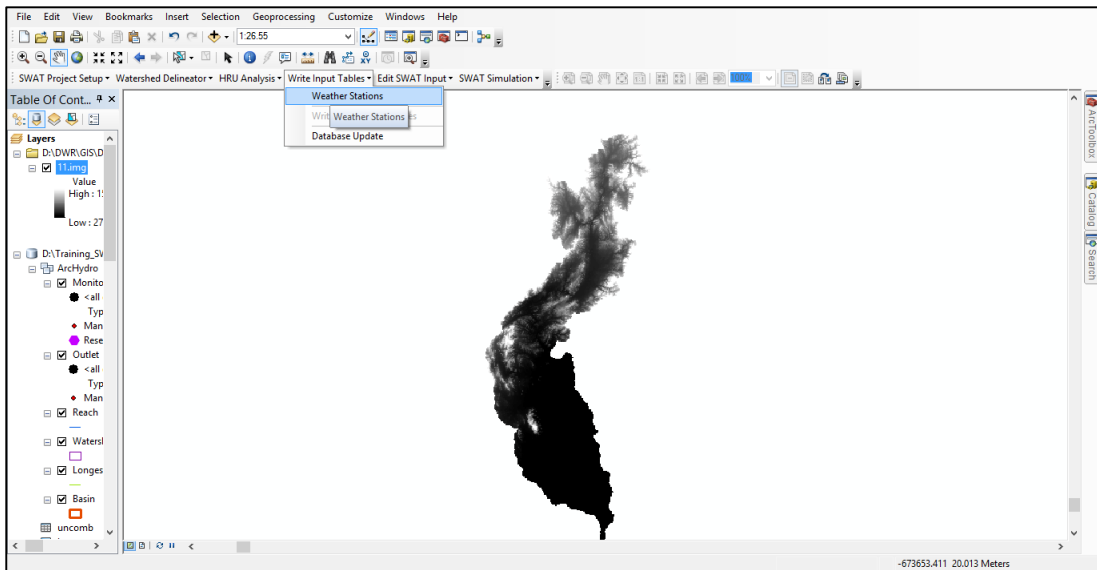


ในการศึกษานี้แนะนำให้ผู้ใช้งานเลือกแบบ Multiple HRU เพื่อให้การคำนวณมีความละเอียดมากขึ้น จากนั้นให้กด Create HRUs ให้โปรแกรมกำหนด HRUs ของแต่ละลุ่มน้ำย่อย รายละเอียดของจำนวนพื้นที่ของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดดิน และความลาดชัน แสดงในส่วนของรายงาน โดยเรียกได้จาก เมนู HRU Analysis Reports จากนั้นจะไปสู่ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลภูมิอากาศนำเข้า การตั้งคำนวณ และเรียกดูผลการคำนวณของแบบจำลอง SWAT

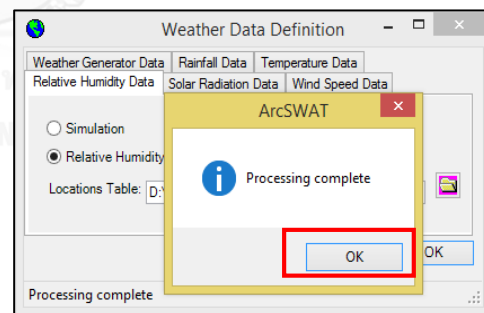
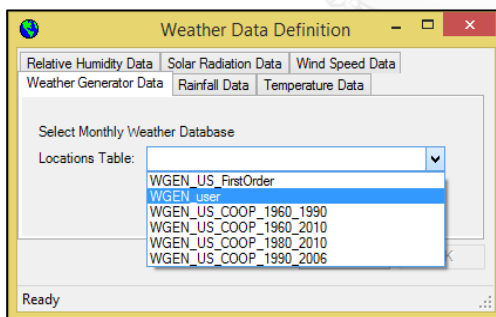
1.2.5 การสร้างไฟล์นำเข้าข้อมูลของแบบจำลอง SWAT

1) การกำหนดลักษณะข้อมูลภูมิอากาศ

เลือกใช้คำสั่ง Weather Station จากเมนู Write Input Table โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างให้กำหนดลักษณะข้อมูลภูมิอากาศต่างๆ ประกอบด้วย 1) ฐานข้อมูลภูมิอากาศ 2) ข้อมูลฝน 3) ข้อมูลอุณหภูมิต 4) ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ 5) ข้อมูลการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ 6) ความเร็วลม



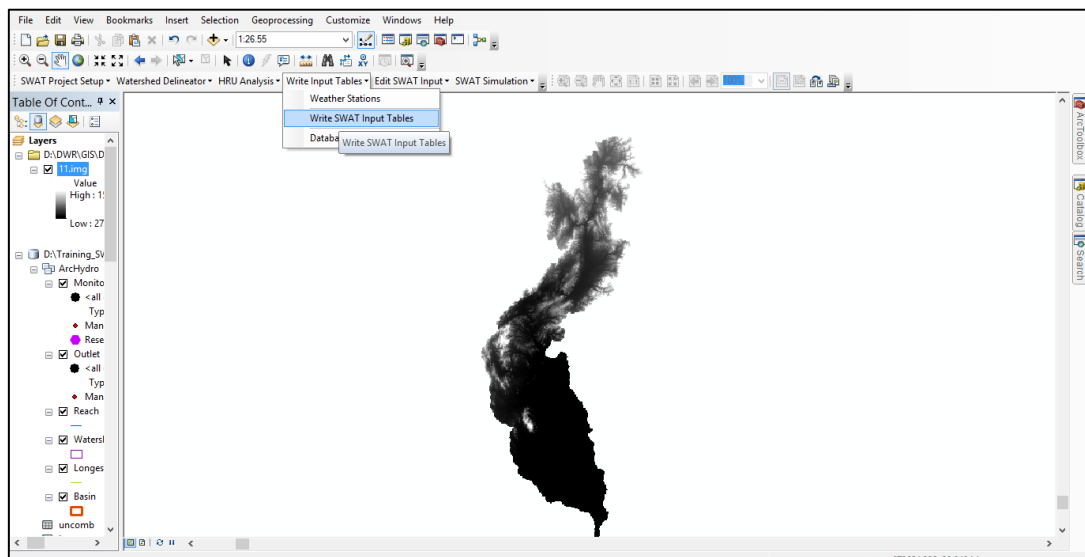
สำหรับช่อง Weather Generator Data ให้เลือก Custom Database แล้วเลือกไฟล์ฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องตามตำแหน่งและค่าเฉลี่ย / สูงสุด / ต่ำสุด ของสถานีตรวจวัดภูมิอากาศบริเวณพื้นที่ศึกษา (สามารถเลือก US Database ได้ เฉพาะกรณีพื้นที่ศึกษาที่อยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกาเท่านั้น) โดยโปรแกรมจะใช้ข้อมูลของสถานีเหล่านี้ ในการคำนวณข้อมูลภูมิอากาศรายวันเพื่อใช้ในการคำนวณแบบจำลอง SWAT ต่อไปจากนั้น กดปุ่ม OK โปรแกรมจะทำการสร้างฐานข้อมูลเฉพาะของโครงการเพื่อเก็บข้อมูลภูมิอากาศตามที่ผู้ใช้งานกำหนด



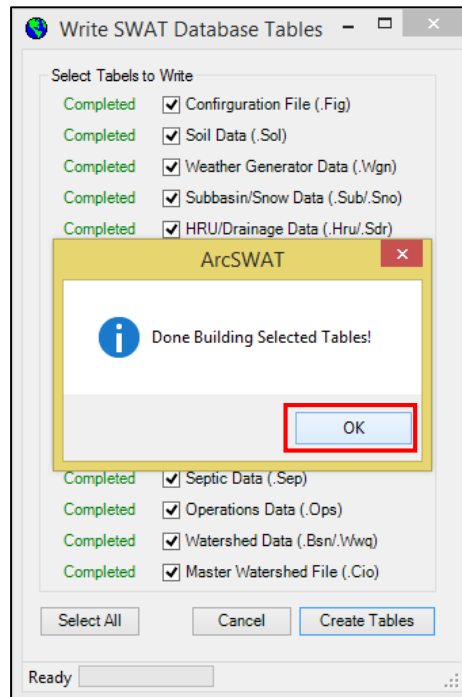
กรณีไม่มีข้อมูลตรวจวัดในพื้นที่ให้ข้ามขั้นตอนนี้ ไม่ต้องทำการใส่ค่าใดๆ เพื่อให้โปรแกรมคำนวณข้อมูลเป็นรายวันโดยอัตโนมัติจากข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยในฐานข้อมูล ArcSWAT หากมีข้อมูลตรวจวัดในพื้นที่ให้เลือกไฟล์ที่แสดงรายชื่อและตำแหน่งของสถานีแต่ละประเภทใน ช่อง Rainfall Data, Temperature Data, Relative Humidity Data, Solar Radiation Data และ Wind Speed Data ตามลำดับ

2) การสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง SWAT

ในเมนู Input ของเมนูบาร์ ผู้ใช้สามารถเลือกคำสั่ง Write SWAT Input Tables เพื่อสร้างข้อมูลนำเข้าทั้งหมดภายในครั้งเดียว หรือเลือกคำสั่งอื่นๆ เพื่อเลือกสร้างไฟล์นำเข้าที่ละไฟล์ก็ได้ โดยไฟล์นำเข้าสำหรับแบบจำลอง SWAT มีทั้งหมด 16 ไฟล์

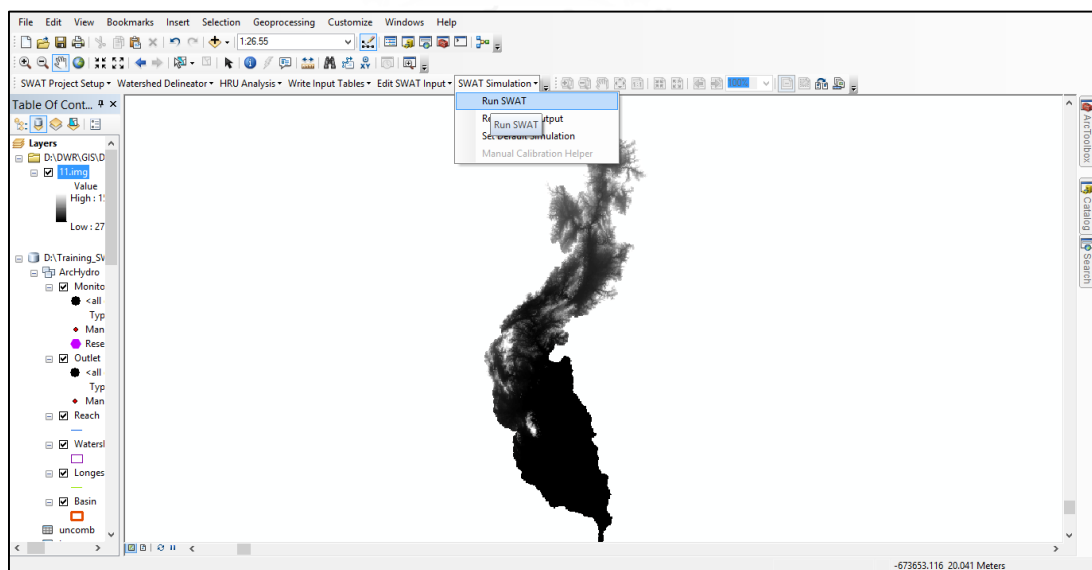


การสร้างไฟล์นำเข้าแบบจำลองจำนวน 16 ไฟล์ เพื่อใช้ในการคำนวณ จากหน้าต่าง Write SWAT Database Input table เลือก Select All และกด Create Tables จากนั้นเมื่อ Complete ทั้ง 16 ไฟล์จะมีหน้าต่างแจ้งเตือน “Done Building Selected Tables” และกดปุ่ม OK การนำเข้าข้อมูลเสร็จสิ้น

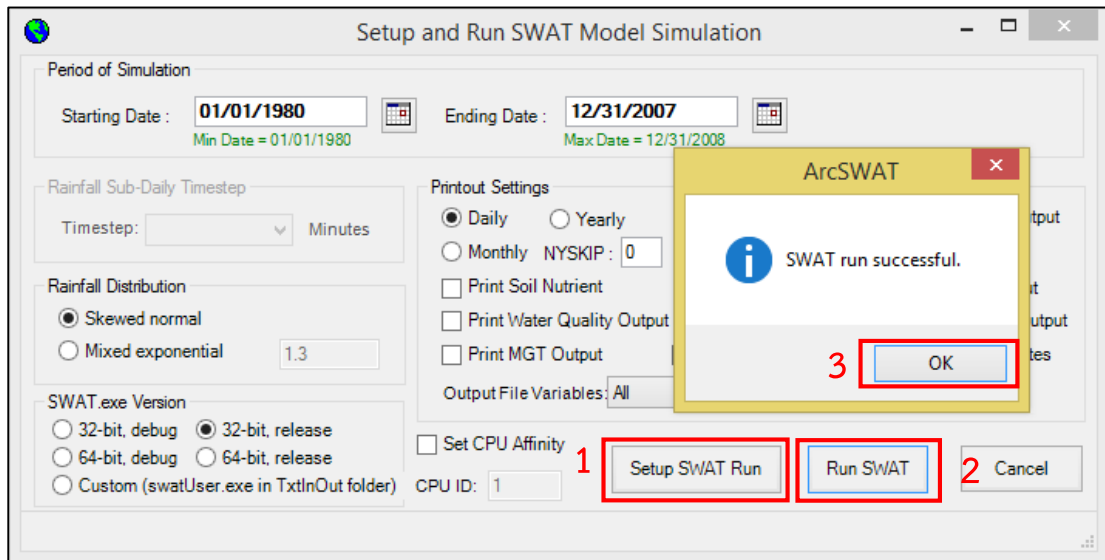


1.2.6 การตั้งค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง SWAT

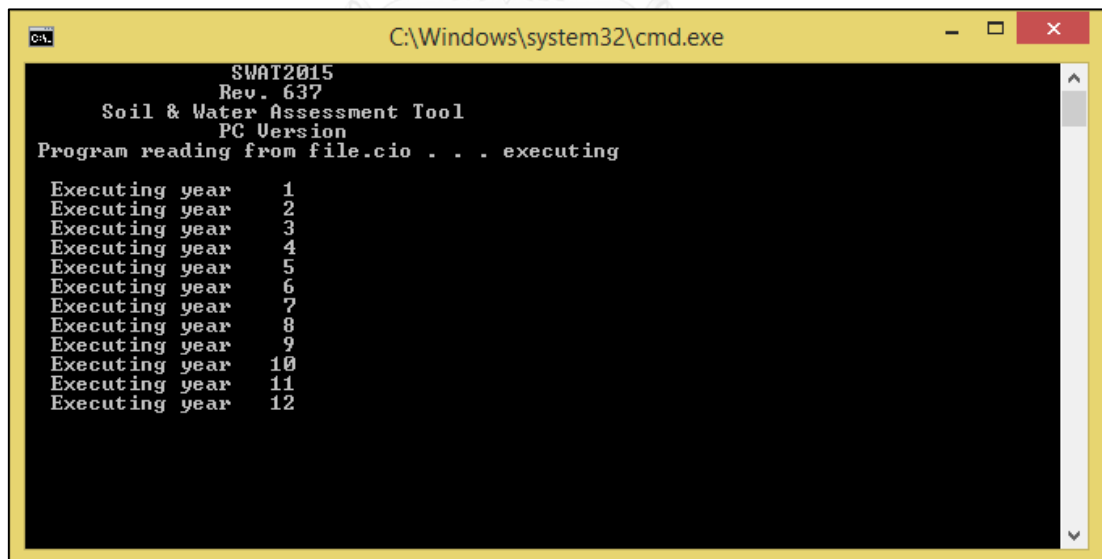
จากเมนูหลัก คลิกเลือกเมนู SWAT Simulation แล้วเลือก Run SWAT โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างให้กำหนดค่าต่างๆ สำหรับควบคุมการคำนวณของแบบจำลอง SWAT



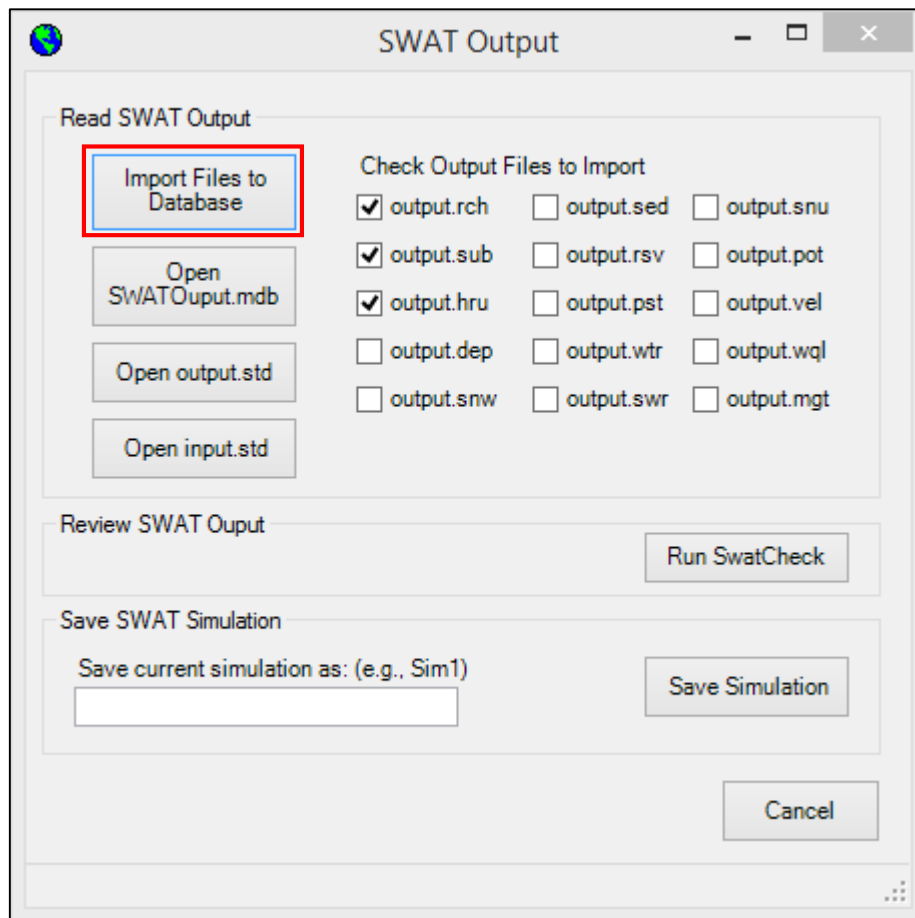
สำหรับในที่นี้ สนใจเฉพาะในส่วนการจำลองน้ำฝน - น้ำท่า ดังนั้น ให้กำหนดส่วนอื่นๆ เป็น Non Active ในที่นี้กำหนด Rainfall Distribution แบบ Skewed normal และคำนวณการไหลแบบรายวัน จากนั้นกด Setup SWAT Run เมื่อ Setup เสร็จแล้ว ให้ทำการ Run SWAT



เมื่อกดปุ่ม Run SWAT เพื่อสั่งคำนวณแบบจำลอง ซึ่งจะปรากฏหน้าต่าง DOS แสดงการคำนวณของแบบจำลอง SWAT



เมื่อทำการรันโปรแกรมเสร็จแล้ว สามารถดูผลลัพธ์การคำนวณจากเมนู Read SWAT Output จะปรากฏหน้าต่าง SWAT Output สำหรับการจำลองน้ำฝน-น้ำท่าให้เลือก .rch, .sub และ .hru



1.3. ผลข้อมูลน้ำท่าจากแบบจำลอง SWAT

1.3.1 ผลลัพธ์จากแบบจำลอง (SWAT Output)

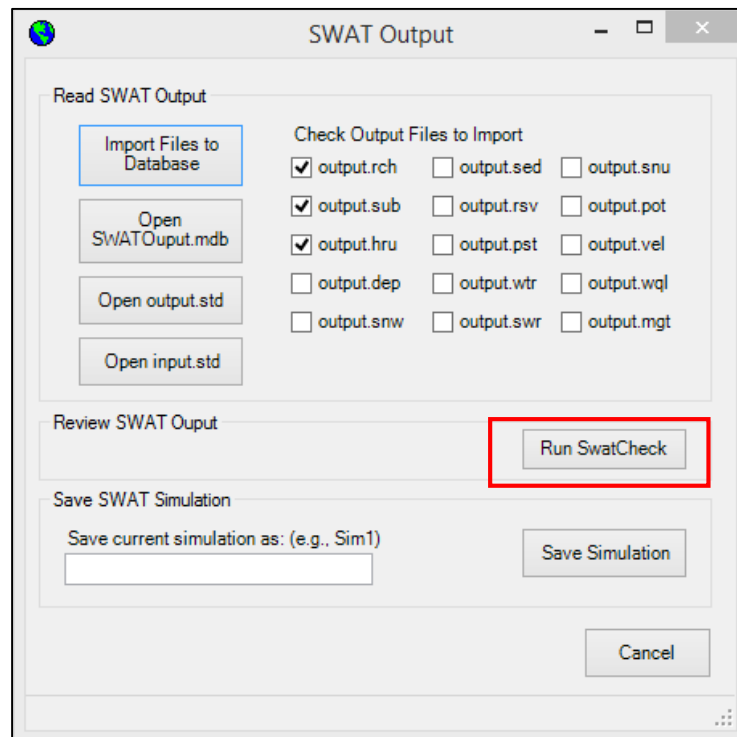
ผลข้อมูลน้ำท่ารายวันของแต่ละลุ่มน้ำย่อย ที่ได้จากการจำลองจะถูกจัดไว้ในไฟล์ชื่อ Output.sub ซึ่งจะแสดงผลรายวันของข้อมูลตัวแปรต่างๆ แต่ละลุ่มน้ำย่อย (Sub) สำหรับปริมาณน้ำท่ารายวันจากการจำลองที่จะนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จริง เพื่อปรับเทียบแบบจำลองคือ คอลัมน์ “FLOW_OUTcms” โดยไฟล์ Output.sub นี้ สามารถเปิดผ่านโปรแกรม Microsoft Access ได้ ในไฟล์ชื่อ SWATOutput.DBF และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการสำรวจได้

SUB	YEAR	MON	AREAKm2	FLOW_INcm	FLOW_OUTcm	FLOW_BASEcm	GW_RCHm	SED_INtons	SED_OUTtor	SEDCONcm	ORGN_L
1	1984	297	3040	77.35	77.4	.6831	0	455	253.1	37.85	
2	1984	297	5505	134.4	134.1	.2988	0	254.4	994.7	85.83	
3	1984	297	6234	150.7	150.1	.3428	0	45.98	40.26	3.106	
1	1984	298	3040	75.25	75.32	.5881	0	376.5	207.9	31.94	
2	1984	298	5505	131.6	131.3	.2755	0	208.5	965.8	85.15	
3	1984	298	6234	147.7	146.3	.4912	0	45.01	38.86	3.076	
1	1984	299	3040	73.27	73.94	.5844	0	311.6	172.2	26.96	
2	1984	299	5505	129.4	128	.3102	0	172.6	918.2	83.04	
3	1984	299	6234	144.1	143.6	.4679	0	43.81	38.01	3.063	
1	1984	300	3040	71.38	71.5	.6372	0	257.9	141.2	22.86	
2	1984	300	5505	126.1	125.6	.3063	0	141.4	897.1	82.65	
3	1984	300	6234	141.5	141.1	.4823	0	43	37.23	3.054	
1	1984	301	3040	69.58	69.63	.6682	0	213.6	116.2	19.32	
2	1984	301	5505	123.4	122.7	.3551	0	116.3	868.8	81.93	
3	1984	301	6234	138.2	137.5	.554	0	41.93	36.06	3.037	
1	1984	302	3040	67.86	67.89	.6658	0	176.9	95.67	16.31	
2	1984	302	5505	120.9	120.4	.2434	0	95.72	847.6	81.47	
3	1984	302	6234	136.1	135	.4317	0	41.28	35.15	3.013	
1	1984	303	3040	66.21	66.24	.6613	0	146.6	78.81	13.77	
2	1984	303	5505	118.4	117.1	.1414	0	78.83	801.4	79.18	
3	1984	303	6234	133	133	.1691	0	40.29	34.45	2.999	
1	1984	304	3040	64.62	64.63	.7126	0	121.4	64.94	11.63	
2	1984	304	5505	115.9	115.8	.3194	0	64.95	796.1	79.55	
3	1984	304	6234	130.8	130.5	.4013	0	39.58	33.8	2.997	
1	1984	305	3040	63.09	63.08	.7021	0	100.6	53.52	9.82	
2	1984	305	5505	113.5	112.8	.3733	0	53.53	766.2	78.64	

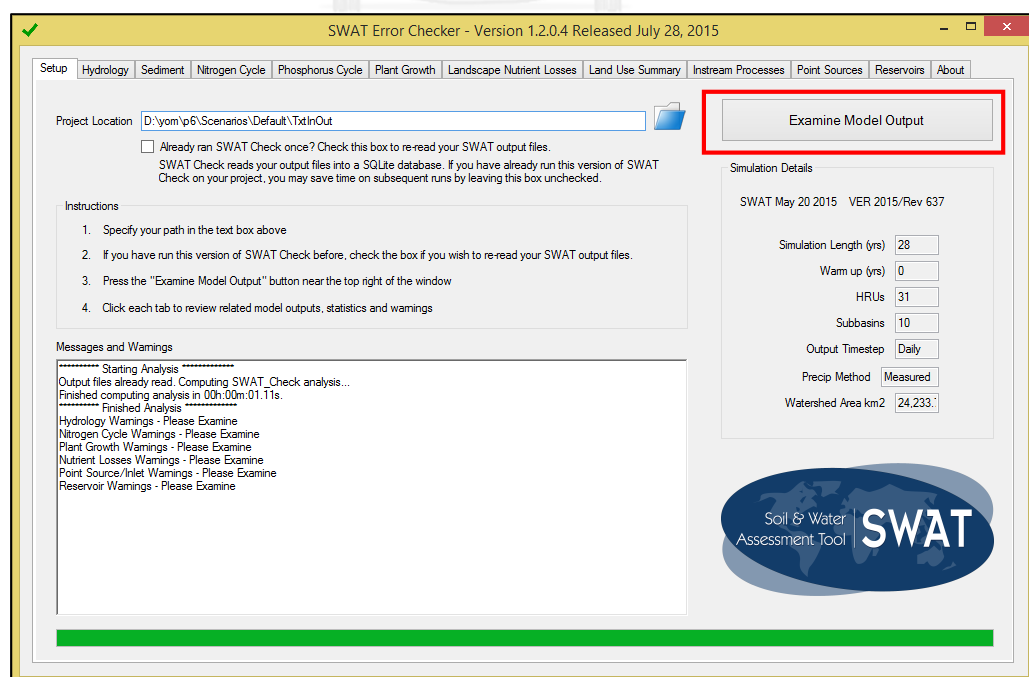
1.3.2 การตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง

โปรแกรม SWAT check เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง SWAT รวมถึงตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลนำเข้า ซึ่งสามารถเรียกใช้ได้หลังจาก Run SWAT โดยเลือกที่เมนู Read SWAT Output จะปรากฏหน้าต่าง SWATOutput ขึ้นมา ให้กดปุ่ม Run Swatcheck จากนั้นจะปรากฏโปรแกรม SWAT Error Checker ให้กดปุ่ม Examine Model Output เมื่อมีการตรวจสอบว่า SWAT ทำงานได้ถูกต้อง จะสามารถดูผลสรุปของแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม SWAT Check ได้เลย

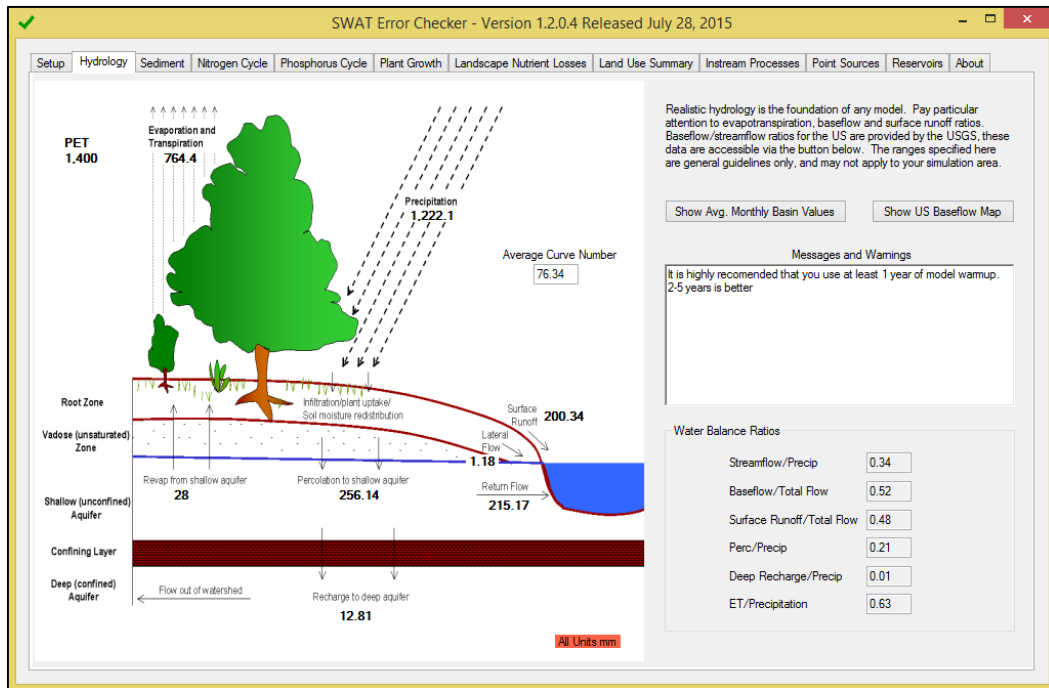
1) เลือกเมนู Read SWAT Output จากนั้นกดปุ่ม Run Swatcheck



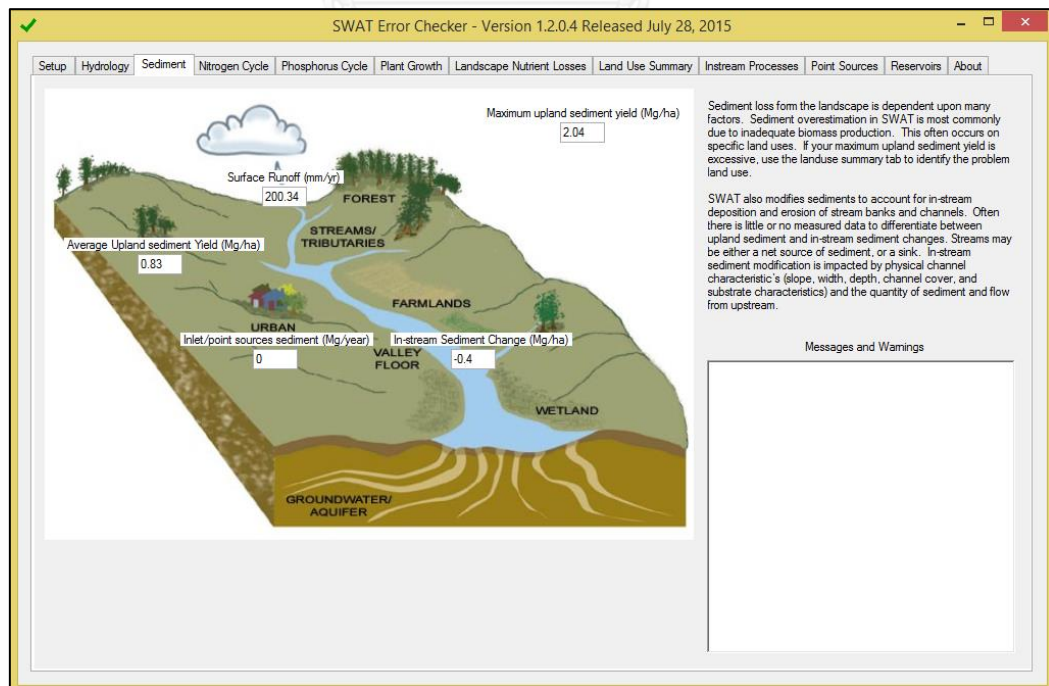
2) เมื่อปรากฏหน้าต่าง SWAT Error Checker ให้กดปุ่ม Examine Model Output



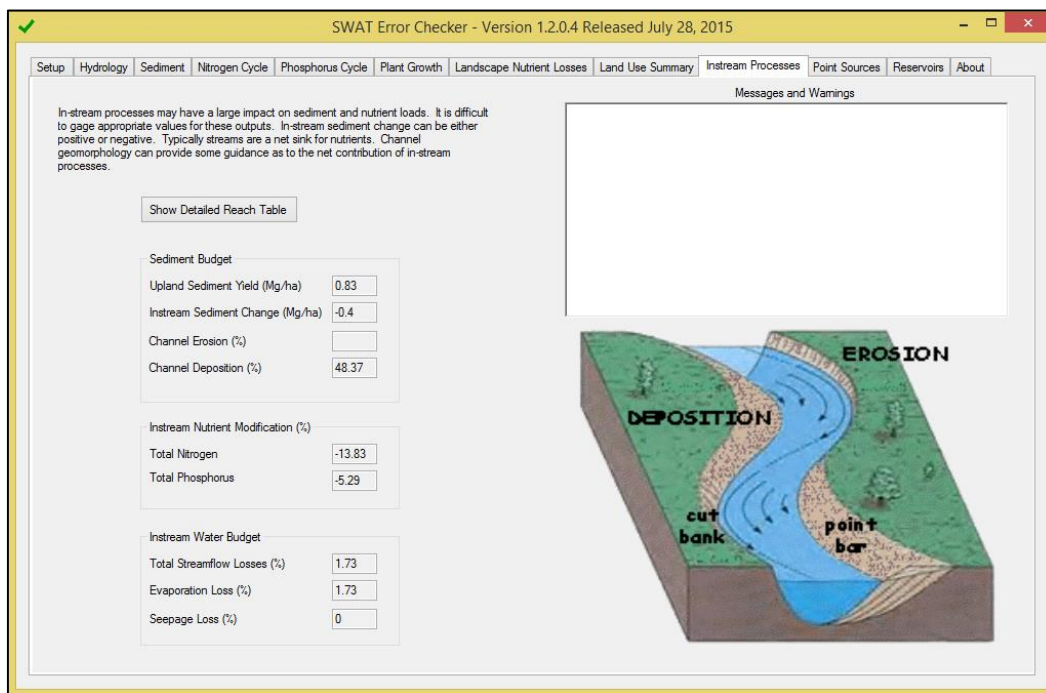
3) แสดงผลสรุปจากผลลัพธ์แบบจำลอง ในรูปแบบวงจรถูกทวิทยา



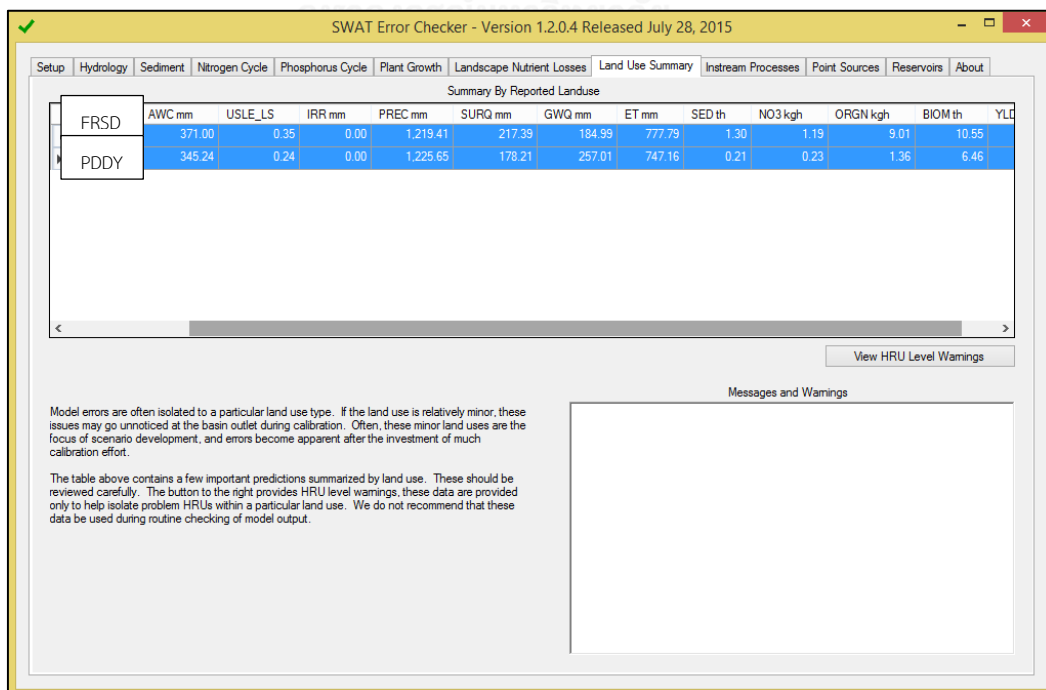
4) แสดงผลสรุปจากผลลัพธ์แบบจำลอง ในรูปแบบการเคลื่อนที่ของตะกอน



5) แสดงผลสรุปจากผลลัพธ์แบบจำลอง ในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของแม่น้ำ



6) แสดงผลสรุปผลลัพธ์แบบจำลอง ในรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน



2.แบบจำลองน้ำบาดาล

แบบจำลอง GMS (Groundwater Modeling System) เป็นแบบจำลองที่ทำหน้าที่จัดการและเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างผู้ใช้กับแบบจำลอง MODFLOW และช่วยในการแสดงผลการคำนวณในรูปแบบรูปภาพ

MODFLOW เป็นแบบจำลองสภาพการไหลของน้ำบาดาลที่พัฒนาขึ้นโดย United State Geological Survey (USGS) โดยสามารถจำลองการไหลได้ทั้งแบบ 1 มิติ, 2 มิติ, กิ่ง 3 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งจำลองได้ทั้งสภาวะการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัว สำหรับกรณีชั้นน้ำบาดาลไร้แรงดัน ชั้นน้ำบาดาลมีความดัน รวมทั้งชั้นน้ำบาดาลแบบผสม และสามารถคำนวณชุดข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้ เช่น อัตราการสูบน้ำ, การเติมน้ำ, การคาย,ระเหย, การระบายน้ำ และความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในทางน้ำกับน้ำบาดาล โดยในตัวโปรแกรมหลักของ MODFLOW ประกอบด้วยโมดูลเล็กๆหลายโมดูล ซึ่งแต่ละโมดูลถูกเรียกว่าชุดการคำนวณ สามารถจัดกลุ่มของชุดการคำนวณได้ 3 กลุ่ม คือ

1. ชุดการคำนวณองค์ประกอบของการไหล (Flow Component Packages) ได้แก่ ชุดการคำนวณ Block Centered Flow, Well, Recharge, Drain, Evapotranspiration และ General Head Boundary
2. ชุดการคำนวณควายาวของช่วงเวลา (Stress Package) ได้แก่ ชุดการคำนวณ Well, Recharge, Drain, River, Evapotranspiration และ General Head Boundary
3. ชุดการคำนวณการแก้สมการ (Solver Packages) ได้แก่ ชุดการคำนวณ Strongly Implicit Procedure, Slice Successive Over Relaxation และ PCG ซึ่งแต่ละชุดการคำนวณจะมีขั้นตอนการทำงาน (Procedures) ดังตารางที่ 2-2

โปรแกรม MODFLOW ถูกออกแบบมาสำหรับจำลองระบบชั้นน้ำบาดาลที่มีลักษณะสอดคล้องตามเงื่อนไขต่อไปนี้

- เป็นชั้นน้ำที่อิ่มตัว
- การไหลเป็นไปตามกฎของดาร์ซี
- ความหนาแน่นของน้ำบาดาลคงที่
- การกระจายตัวลักษณะวัสดุด้านชลศาสตร์ในแนวราบของระบบต้องไม่มีความแปรปรวนมากนัก
- สมการที่ใช้ในการคำนวณใน MODFLOW คือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.25)$$

โดย	K_{xx} , K_{yy} และ K_{zz}	คือ	ค่าความนำทางชลศาสตร์ตามแนวแกน x, y และ z (L^{-1})
	h	คือ	ระดับน้ำ (L)
	W	คือ	Volumetric Flux ต่อหน่วยปริมาตร แทน Source หรือ Sink ถ้ามีค่าเป็น + หมายถึง มีการเติมน้ำ มีค่าเป็น - คือ มีการสูบน้ำออก (T^{-1})
	S_s	คือ	ค่าความสามารถในการให้น้ำของชั้นหินให้น้ำ (L^{-1})
	t	คือ	เวลา (T)

โดยในแบบจำลอง MODFLOW ได้มีการจัดเตรียมชุดคำสั่งต่างๆ ไว้ สำหรับในการคำนวณและจำลองภาพการไหลของน้ำบาดาลดังตาราง จ.1

ตารางที่ จ.1 ชุดคำสั่งการคำนวณภายในแบบจำลอง MODFLOW และข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ชื่อชุดการคำนวณ	หน้าที่	ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ
Basic	จัดการพื้นฐานของแบบจำลอง เช่น การกำหนดขอบเขต ระบบกริด ช่วงเวลาในการคำนวณ, เงื่อนไขตั้งต้น และรูปแบบการนำเสนอผลลัพธ์	จำนวนชั้นน้ำหลัก และแถวของระบบกริด ค่าระดับน้ำเริ่มต้น จำนวน stress period จำนวนช่วงเวลา และขอบเขต
Block Centered Flow	กำหนดค่าพารามิเตอร์ ในการคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ของการไหลในตัวกลางรูพรุนในแต่ละกริดเซลล์ เช่น ค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ของชั้นน้ำ	สภาพการจำลองชนิดของชั้นน้ำ ค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำ สัมประสิทธิ์การกักเก็บ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวตั้ง
Well	จัดการข้อมูลการสูบน้ำ ที่ตั้งบ่อน้ำบาดาล	จำนวน ตำแหน่ง อัตราการสูบน้ำ
Recharge	จัดการข้อมูลการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล	พื้นที่การเติมน้ำ อัตราการเติมน้ำ
River	จัดการข้อมูลทางน้ำ และระดับในทางน้ำ ซึ่งมีผลต่อการไหลของน้ำบาดาล	ตำแหน่ง รูปร่างของทางน้ำ ระดับน้ำ และคุณสมบัติของวัสดุท้องน้ำ
Drain	จัดการข้อมูลการระบายน้ำ	-
Evapotranspiration	จัดการข้อมูลการคายระเหย	-
General Head Boundary	กำหนดระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำต่างๆ	ค่าระดับน้ำบาดาลในชั้นต่างๆ
Strongly Implicit Procedure	ควบคุมระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแก้ปัญหาหระบบสมการ Finite Different โดยการคำนวณซ้ำแบบ Implicit	ค่าเงื่อนไขในการคำนวณซ้ำในแต่ละช่วงเวลา และรายละเอียดของการคำนวณ
Slice Successive Over Relaxation	ควบคุมระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาหระบบสมการ Finite Different โดยการคำนวณซ้ำแบบ Slice Successive Over Relaxation	-

2.1 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง MODFLOW

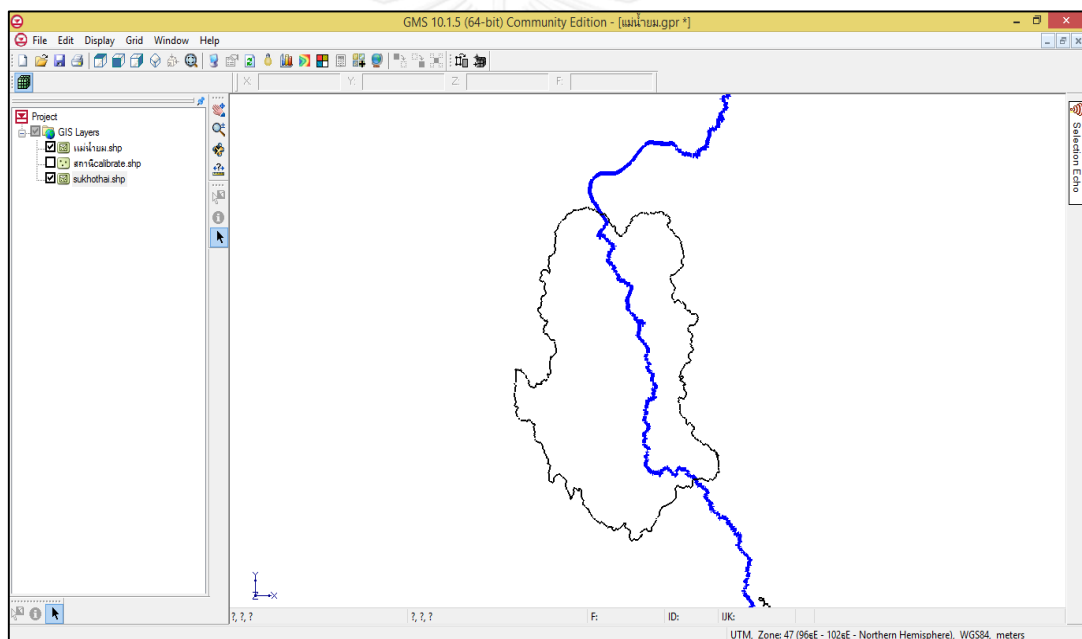
คาบเวลาของแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็นลำดับของช่วงเวลาที่น่าสนใจในการคำนวณเรียกว่า Stress Period แต่ละ Stress Period อาจแบ่งออกเป็นลำดับของ Time Step ซึ่งเป็นช่วงเวลาย่อยของ Stress Period ระบบของสมการ Finite Difference ของสมการการไหลจะถูกสร้างขึ้น และแก้สมการในแต่ละโหนดที่จุดสุดท้ายของแต่ละ Time Step และใช้วิธีการหาค่าตอบซ้ำในการแก้สมการเพื่อหาค่าระดับน้ำแต่ละ Time Step และในสภาพจำลองหนึ่ง จะมี 3 Loop อยู่ข้างใน ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลัก ประกอบด้วย

- Define Procedure เป็นการกำหนดสภาพปัญหาที่จำลอง เช่น ขนาดของโมเดล ชนิดของแบบจำลอง (Transient หรือ Steady-State) จำนวนของ Stress Period แนวทางเลือกทางอุทกวิทยา และวิธีในการแก้ไขปัญหาที่ต้องการ
- Allocate Procedure เป็นการจัดสรรตำแหน่งของหน่วยความจำ
- Read and Prepare Procedure เป็นส่วนที่ข้อมูลทั้งหมดที่ไม่ใช่ฟังก์ชันของเวลา ซึ่งเป็นข้อมูลค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ระดับน้ำเริ่มต้น (Initial Head) ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Transmissivity) สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity) ค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกัก (Specific Storage) ระดับผิวบนและผิวล่างของชั้นน้ำต่างๆ และพารามิเตอร์จำเป็นในวิธีการแก้ปัญหา และจัดเตรียมข้อมูลสำหรับขั้นตอนต่อไป
- Stress Procedure เป็นการกำหนดจำนวนความยาวของแต่ละช่วงระยะเวลาในการคำนวณในแต่ละ Stress Period และข้อมูลในการคำนวณความยาวของแต่ละช่วงจะถูกอ่านค่า
- Read and Prepare Procedure เป็นการอ่านข้อมูลที่เกี่ยวกับ Stress Period เช่น อัตราการสูบน้ำ และพื้นที่เติมน้ำจะถูกอ่านและเตรียมไว้ งานขั้นนี้จึงเข้าสู่ Time-Step Loop
- Advance Procedure ความยาวของช่วงระยะเวลาในการคำนวณจะถูกคำนวณ และค่าระดับน้ำของจุดเริ่มต้นจะถูกใช้ในการเริ่มคำนวณ Iteration Loop
- Formulate Procedure เป็นการหาค่า Conductance และสัมประสิทธิ์ต่างๆ สำหรับแต่ละโหนดที่จำเป็นต้องใช้ในสมการการไหล
- Approximate Procedure ซึ่งประมาณคำตอบของสมการเชิงเส้นของค่าระดับน้ำ การทำซ้ำและต่อเนื่องไปจนกระทั่งทำไปถึงค่าสูงสุดของการคำนวณซ้ำที่ยอมให้ที่จุดสุดท้ายของ Iteration Loop หรือคำนวณจนถึงค่าผิดพลาดที่กำหนด

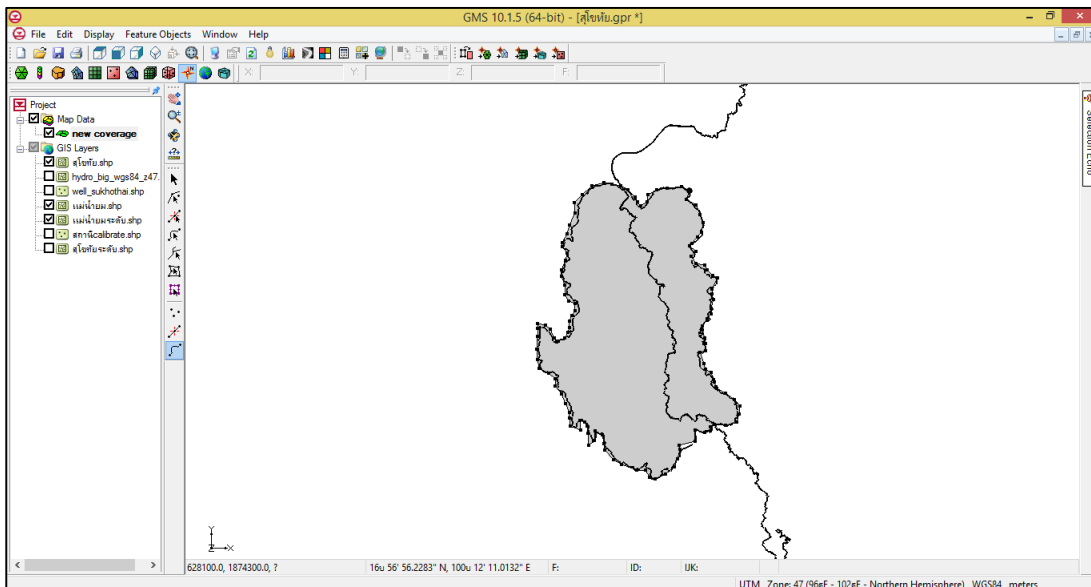
2.2 การนำเข้าสู่ข้อมูลสำหรับแบบจำลอง MODFLOW

การจำลองสภาพน้ำบาดาล ด้วยวิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference) หน่วยย่อยในการคำนวณเชิงพื้นที่นั้นอยู่ในรูปของโครงสร้างที่ติดต่อกันเป็นสี่เหลี่ยม โดยการศึกษาค้างนี้จำลองสภาพน้ำบาดาลให้มีหน่วยย่อยของพื้นที่การคำนวณเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดสุโขทัย โดยมีความสูงของกริดเซลล์ตามความหนาของชั้นน้ำบาดาลเฉลี่ยในพื้นที่นั้น ครอบคลุมพื้นที่ 6,956 ตารางกิโลเมตร แบบจำลองกริดเซลล์ของชั้นน้ำบาดาลเป็นตัวแทนลักษณะของชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่ที่กริดเซลล์ครอบคลุมอยู่ โดยแต่ละกริดเซลล์ได้กำหนดคุณสมบัติทางอุทกธรณีวิทยาของชั้นน้ำบาดาลไว้ รวมถึงระดับน้ำบาดาล และปริมาณไหลเข้า-ออกของน้ำในชั้นน้ำบาดาลนั้น

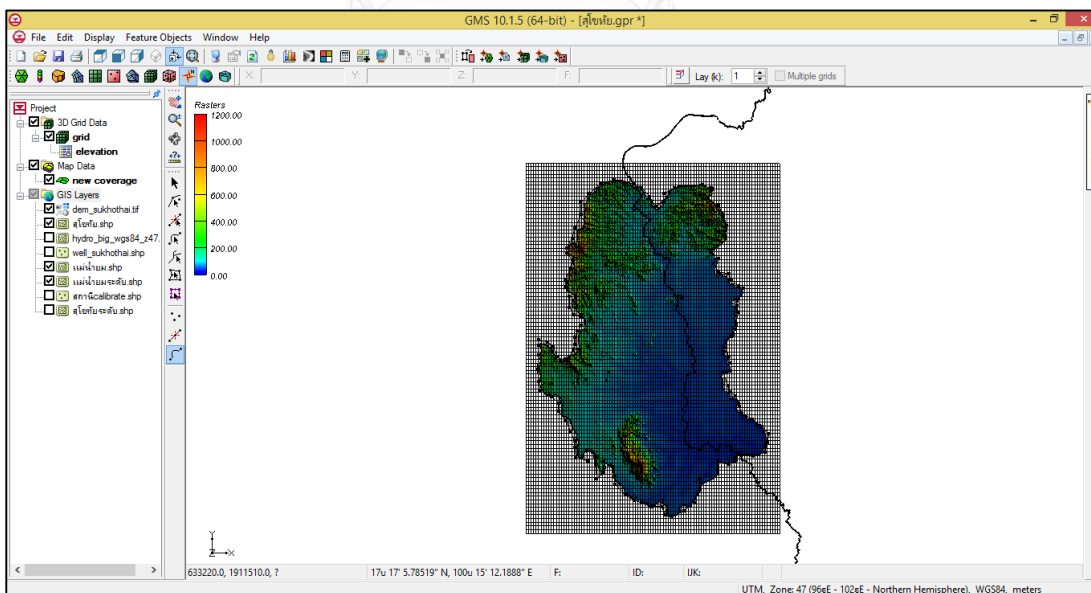
1) การนำเข้าขอบเขตพื้นที่และแม่น้ำเพื่อสร้างแบบจำลองน้ำบาดาล



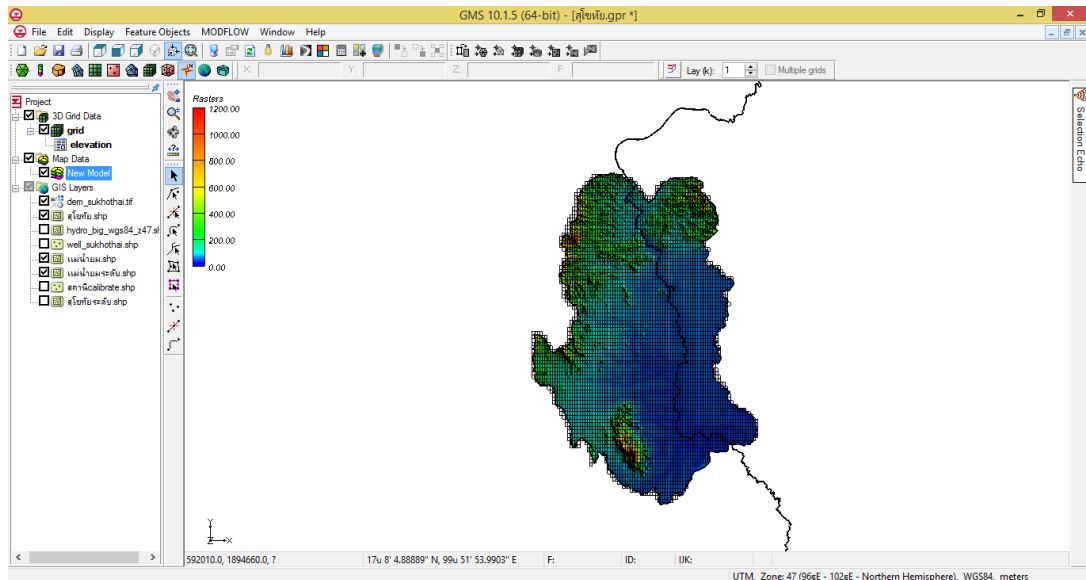
2) สร้างแบบจำลองเชิงพื้นที่ของแบบจำลองน้ำบาดาล



3) ออกแบบกริดเซลล์ในพื้นที่ศึกษาเพื่อใช้ในการคำนวณ

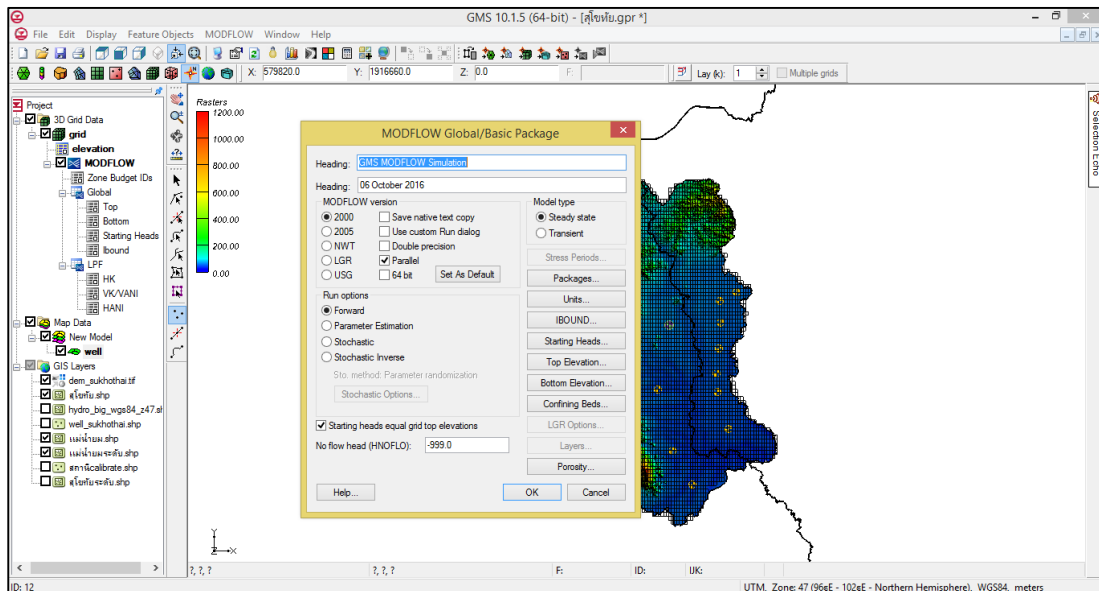


4) กำหนดขอบเขตการคำนวณตามแนวขอบเขตพื้นที่ศึกษา

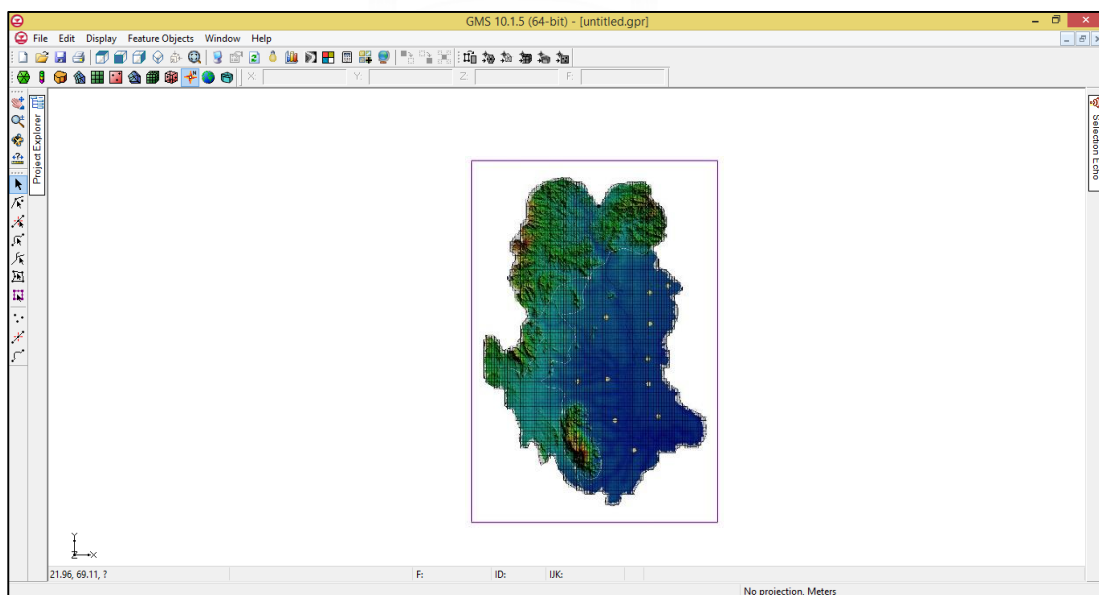


การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองน้ำบาดาลนั้น อาศัยข้อมูลแนวตัดขวางสภาพอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาเพื่อดูลักษณะชั้นน้ำ พบว่าทางด้านเหนือติดจังหวัดอุตรดิตถ์และพะเยา ทิศตะวันตกติดกับจังหวัดตาก และตะวันออกติดกับจังหวัดพิษณุโลก เป็นชั้นหินแข็งและเป็นขอบแอ่งน้ำบาดาลเจ้าพระยาตอนบนจึงกำหนดให้แนวทั้งสามมีค่าเงื่อนไขขอบเขตแบบไม่มีการไหล ทิศใต้กำหนดให้ขอบเขตแบบอัตราการไหลคงที่ตามทิศทางการไหลของแม่น้ำยม ส่วนชั้นน้ำบาดาลล่างกำหนดขอบเขตแบบไม่มีการไหล นอกนั้นด้านบนของแบบจำลองกำหนดให้เปิดสู่บรรยากาศ ด้านล่างกำหนดให้เป็นขอบเขตที่ไม่ยอมให้น้ำไหลผ่าน

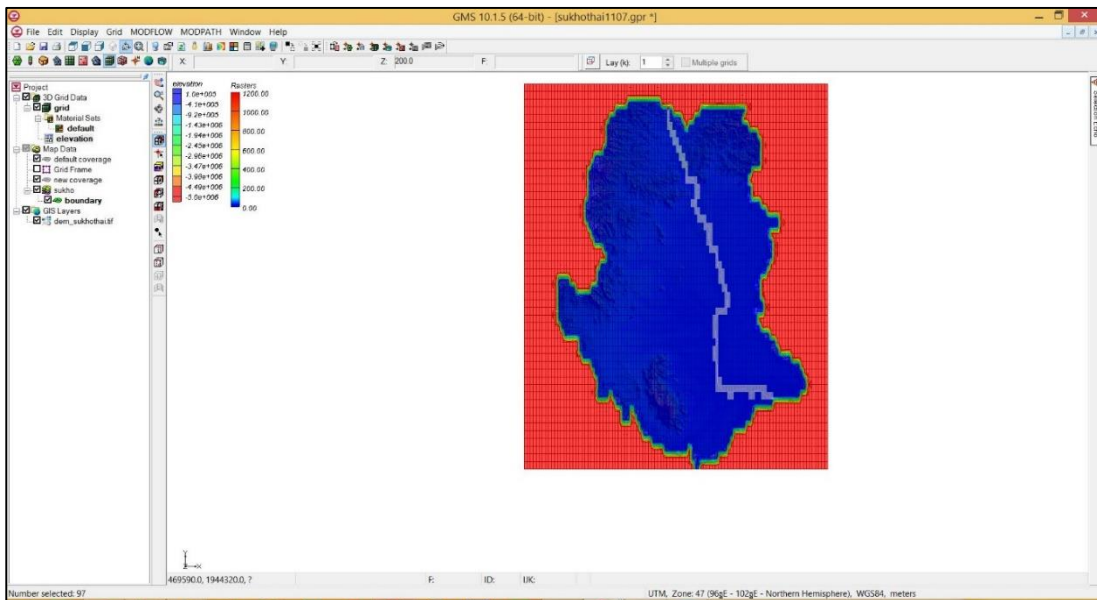
5) กำหนดคุณสมบัติของแบบจำลอง MODFLOW



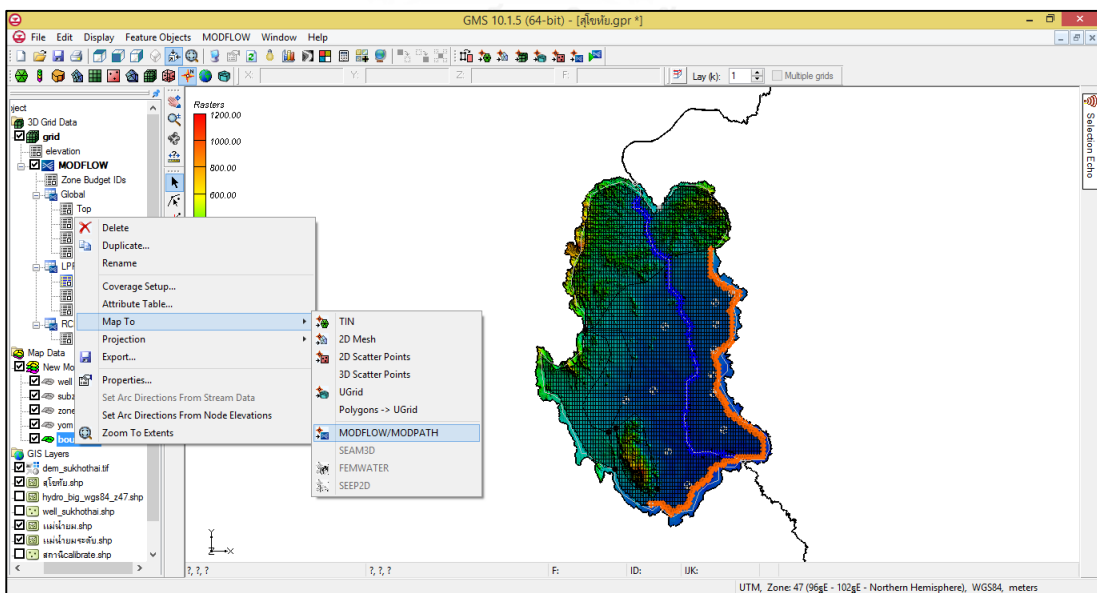
6) กำหนดบ่อสูบน้ำบาดาลตัวแทนและจุดปรับเทียบระดับน้ำบาดาล



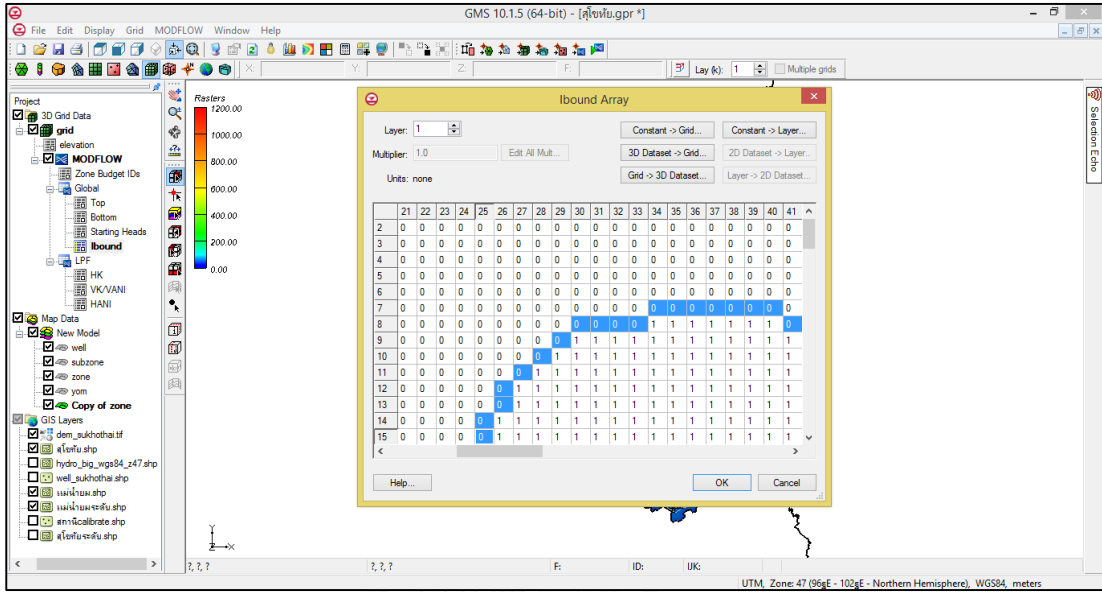
7) กำหนดกริดเซลล์ River Package ลำน้ำของแบบจำลองน้ำบาดาล



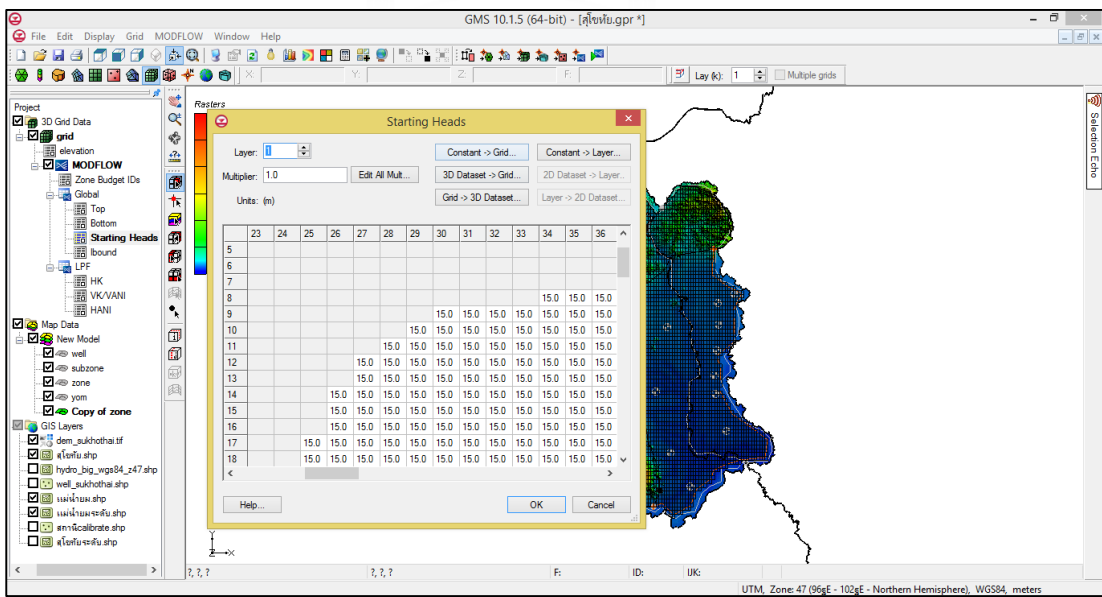
8) สร้างชุดพารามิเตอร์เพื่อนำเข้าแบบจำลอง MODFLOW



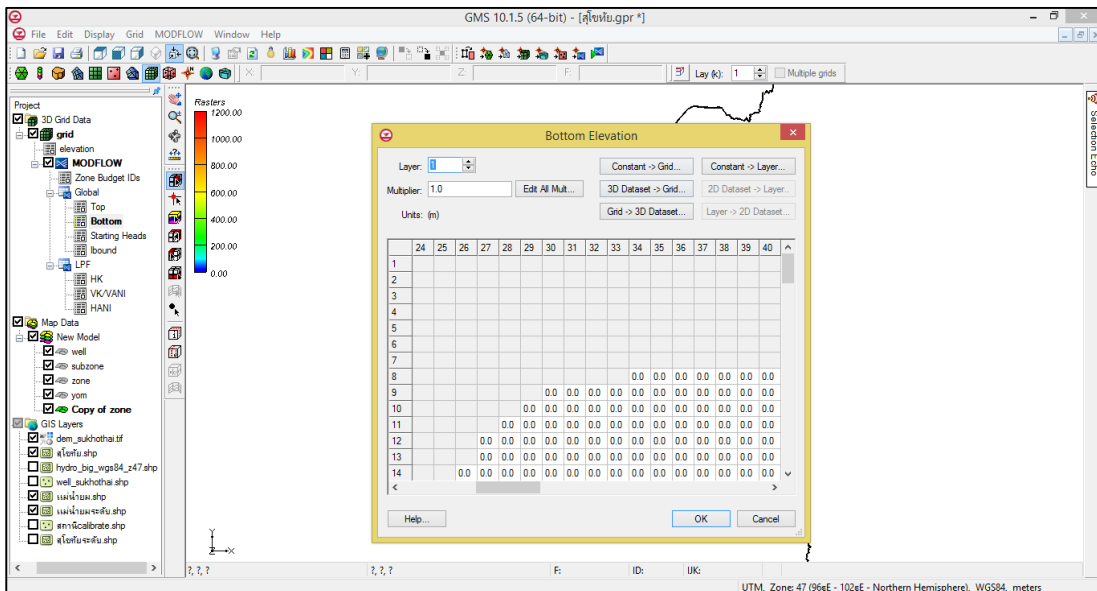
9) กำหนดกริดเซลล์ที่ต้องการคำนวณเป็นชนิด Active Grid (หมายเลขหนึ่ง)



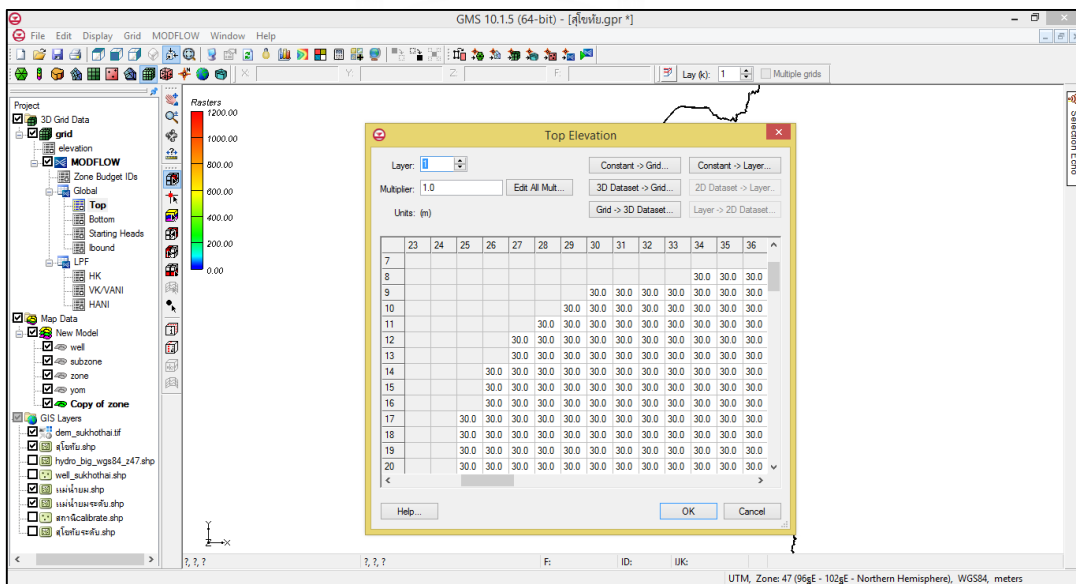
10) กำหนดระดับน้ำบาดาลเริ่มต้น (Starting Head)



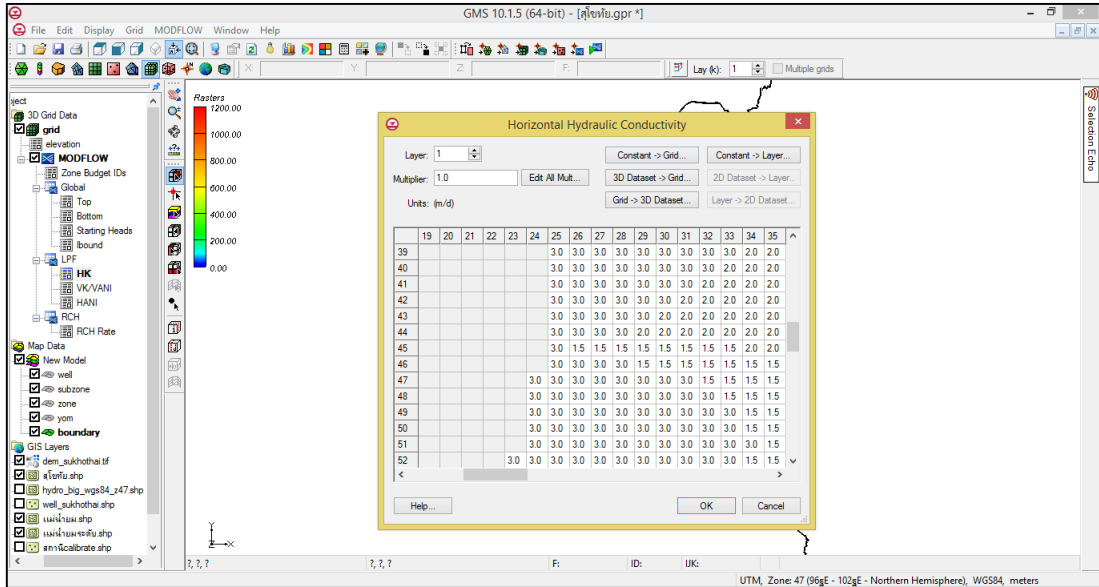
11) กำหนดระดับต่ำสุดของพื้นที่ศึกษา (Bottom Elevation)



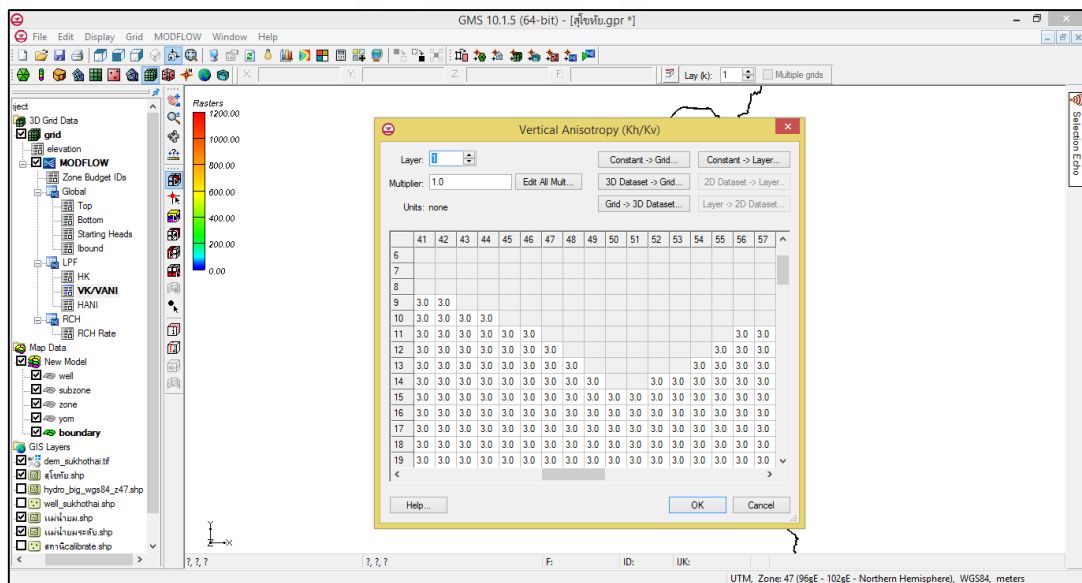
12) กำหนดระดับสูงสุดของพื้นที่ศึกษา (Top Elevation)



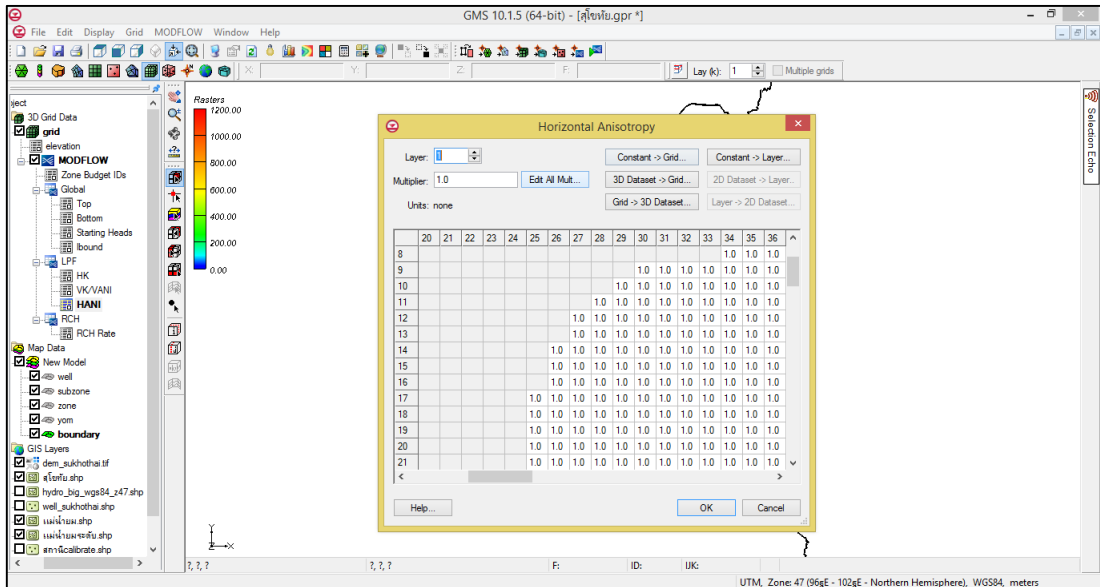
13) กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ที่น้ำซึมผ่านได้ (Horizontal Hydraulic Conductivity, Kh)



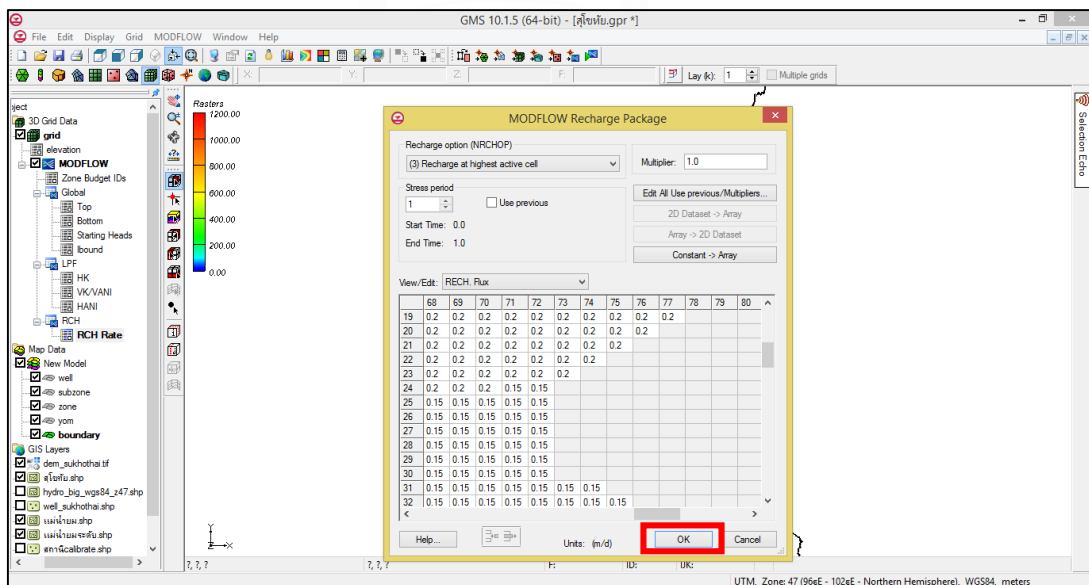
14) สัดส่วนค่าสัมประสิทธิ์ที่น้ำซึมผ่านได้ (Vertical Anisotropy, Kh/Kv)



15) สัดส่วนค่าสัมประสิทธิ์ที่น้ำซึมผ่านได้ (Horizontal Anisotropy, Kx/Ky)



16) ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Recharge Package)



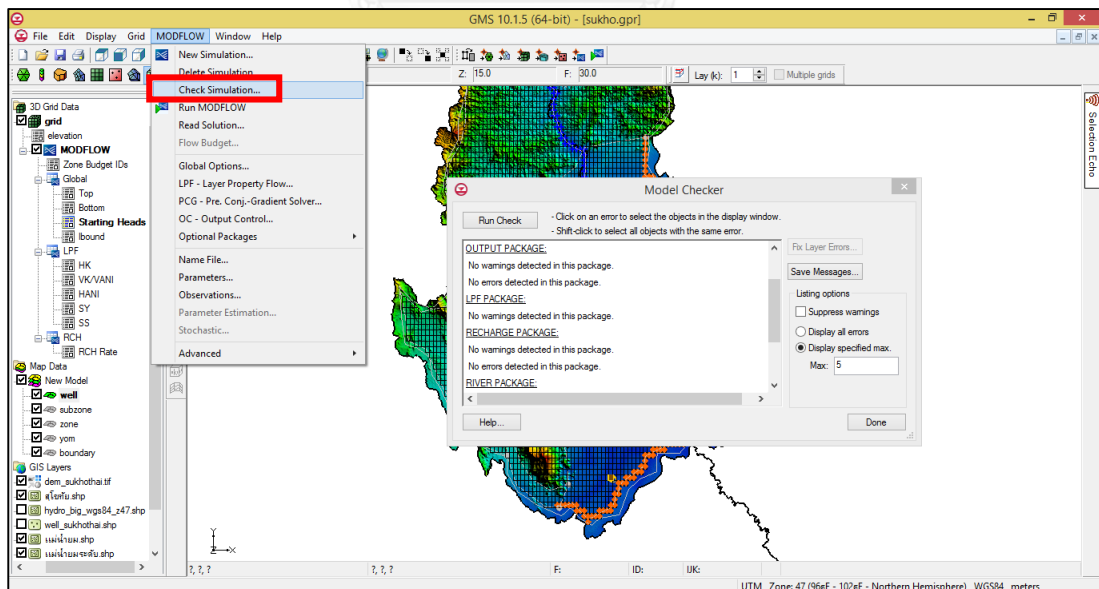
ในการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองน้ำบาดาลให้แนวทั้งสองให้มีค่าเงื่อนไขขอบเขตอัตราการไหลคงที่สำหรับอัตราการไหลเข้า-ออกของแต่ละกริดเซลล์ คำนวณจากสมการ

$$Q = KiA$$

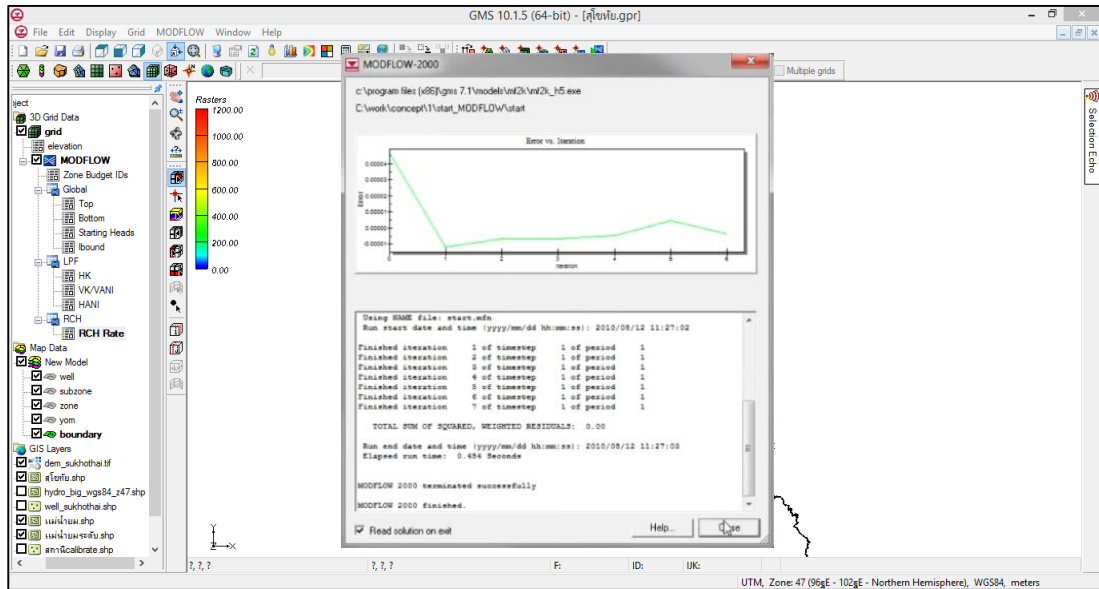
โดย	Q	คือ	อัตราการไหลเข้าหรือออกของน้ำบาดาล (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
	K	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เมตรต่อวัน)
	I	คือ	ความลาดชันชลศาสตร์
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดการไหล (ตารางเมตร)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่กริดเซลล์ต่างๆ ได้จากข้อมูลการเฉลี่ยจากการสุบทดสอบในพื้นที่ สามารถหาค่าความลาดชันชลศาสตร์ โดยพิจารณาได้จากเส้นชั้นความสูงเฉลี่ยของระดับน้ำบาดาลในฤดูกาลนั้นๆ และพื้นที่หน้าตัดการไหลเท่ากับขนาดของกริดเซลล์

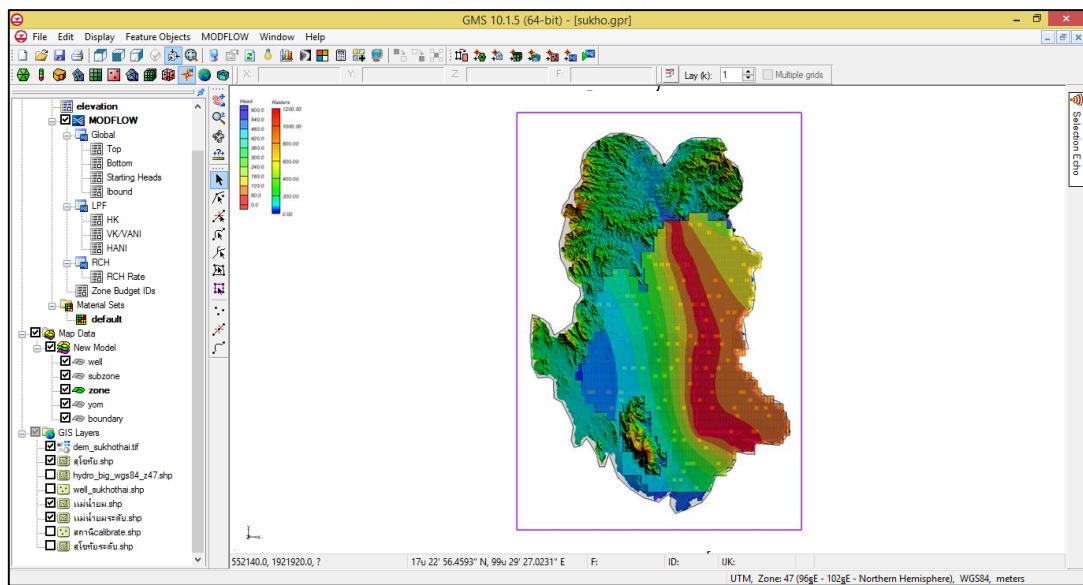
17) ตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบจำลอง (Check Simulation)



18) คำนวณแบบจำลองน้ำบาดาล (Run Simulation)

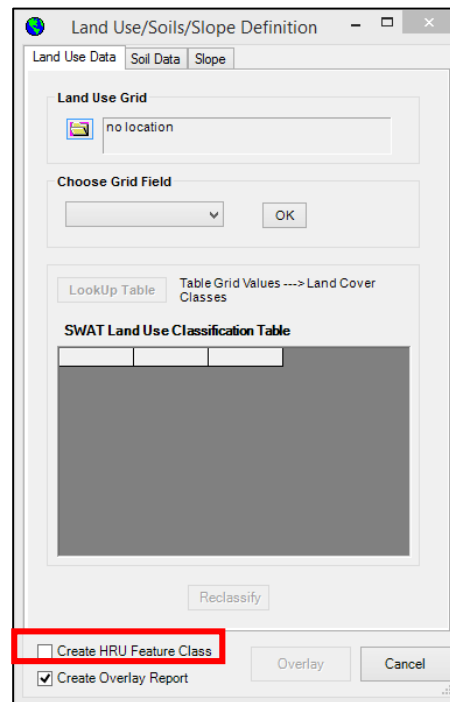


19) ผลการจำลองน้ำบาดาล MODFLOW

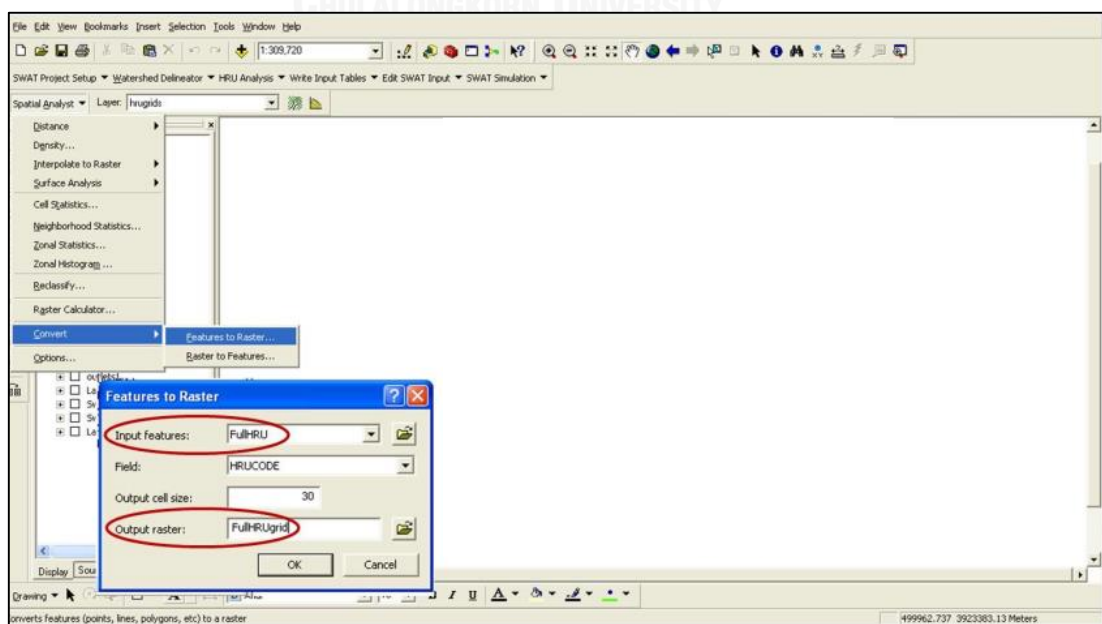


3. การเชื่อมต่อแบบจำลองน้ำผิวดินและน้ำบาดาล

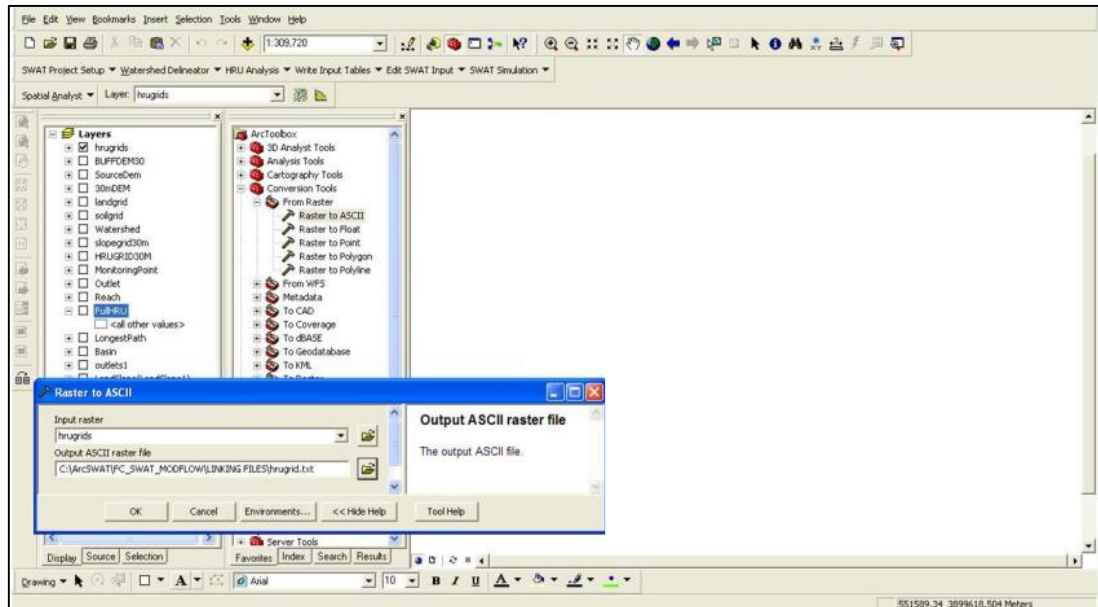
- 1) สร้างไฟล์ข้อมูล HRU จากแบบจำลอง SWAT



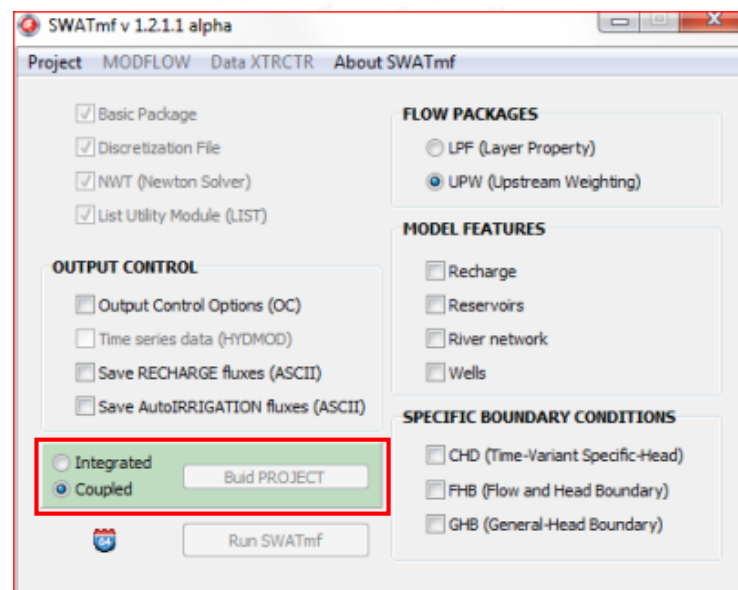
- 2) แปลง HRU Code เป็นไฟล์ Raster ซึ่งแสดงผลข้อมูลเป็นรายกริดเซลล์



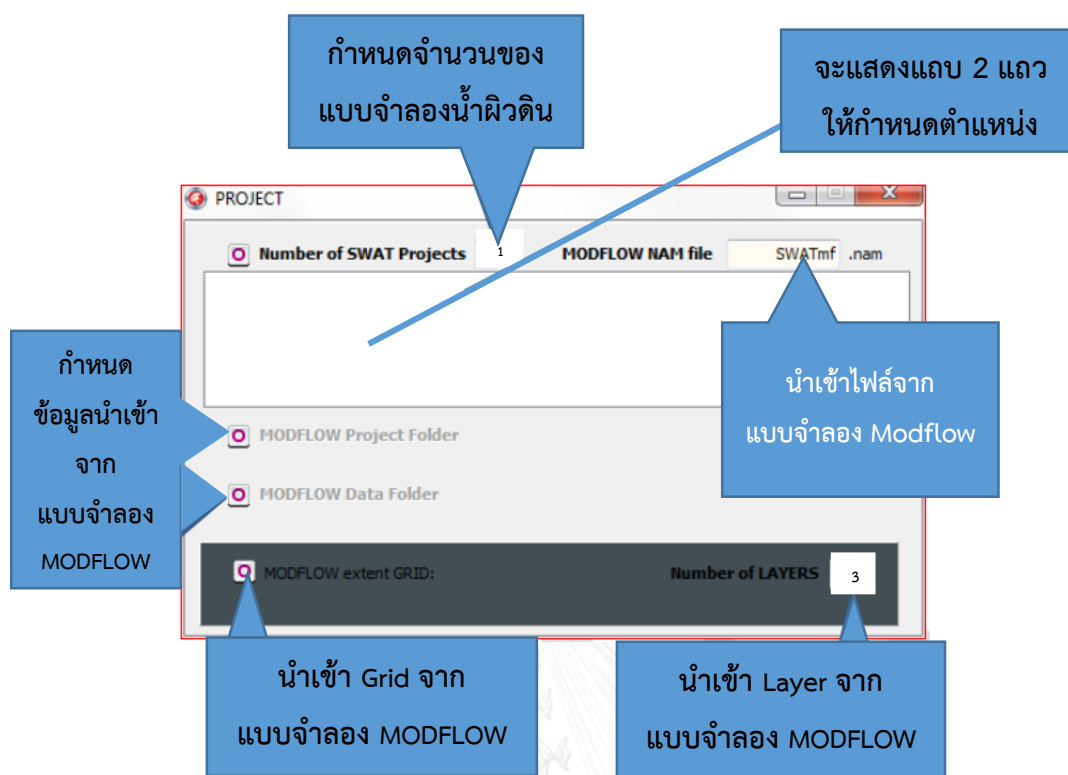
3) ส่งออก HRU ในรูปแบบไฟล์ (*.txt) เพื่อเชื่อมกับกริดเซลล์บนแบบจำลอง MODFLOW



4) เปิดโปรแกรม SWATmf เพื่อทำการเชื่อมต่อแบบจำลองน้ำผิวดินและน้ำบาดาล



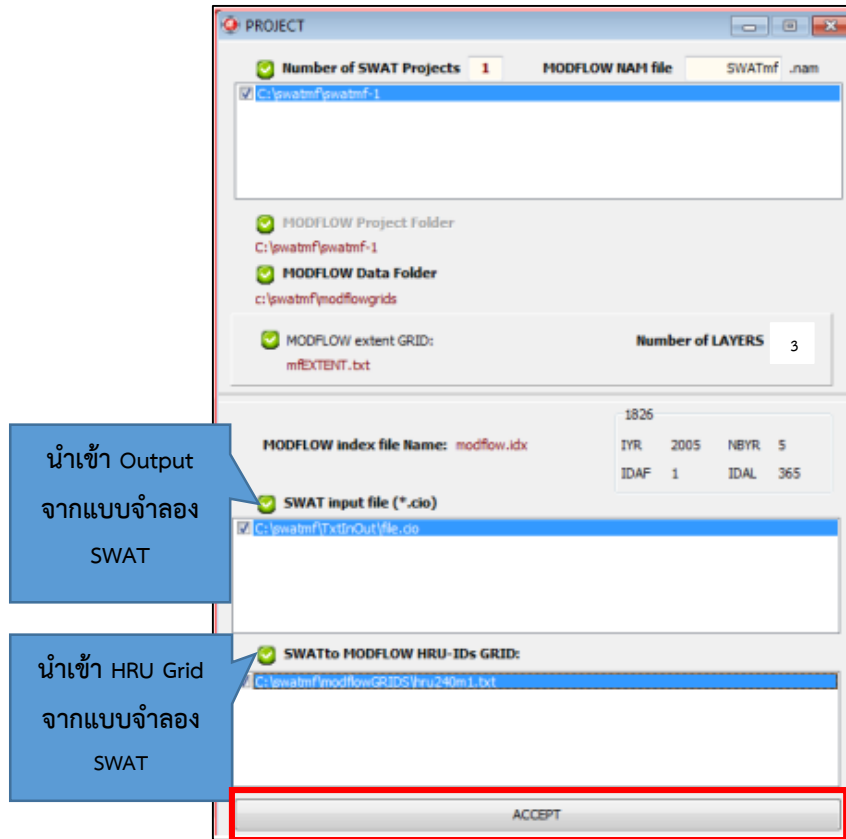
5) สร้าง Project เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ระหว่างน้ำผิวดินและน้ำบาดาล



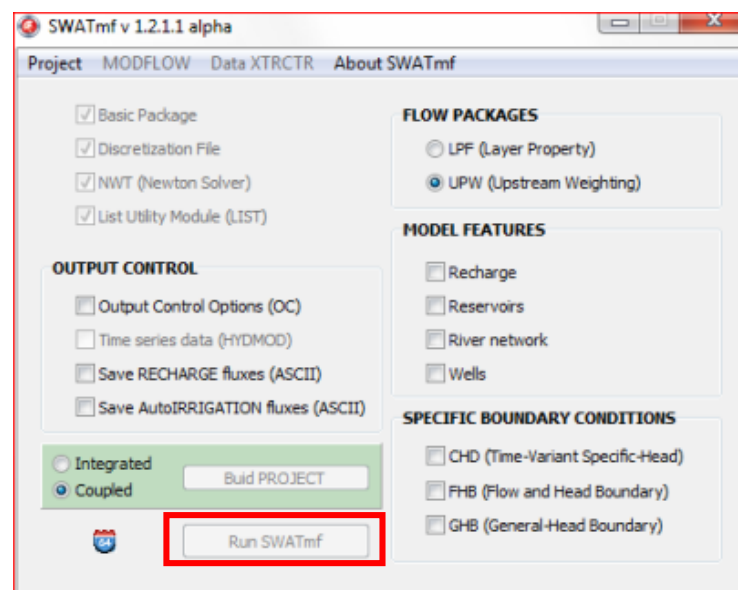
การสร้าง Project ในโปรแกรม SWATmf เพื่อเชื่อมต่อแบบจำลองน้ำผิวน้ำท่า ArcSWAT กับแบบจำลองน้ำบาดาล GMS-MODFLOW โดยใช้ชุดโปรแกรมการคำนวณเพื่อเชื่อมต่อโดยใช้ภาษาคอมไพเตอร์ FORTAN เพื่อคำนวณสมมูลน้ำในแต่ละกริด โดยมีการถ่ายโอนพารามิเตอร์ระหว่าง 2 แบบจำลอง ประกอบด้วย ปริมาณการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลรายเดือน (Groundwater Recharge) ระดับน้ำรายเดือนจากแบบจำลอง SWAT เข้าสู่กริดที่กำหนดในแบบจำลอง GMS-MODFLOW

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้กริดตามแบบจำลอง GMS-MODFLOW เป็นหลัก ดังนั้นหากขนาดของกริดเซลล์ในแต่ละแบบจำลองไม่เท่ากัน โปรแกรม SWATmf จะเฉลี่ยค่าในแต่ละกริดเซลล์ของแบบจำลอง SWAT เพื่อถ่ายโอนสู่กริดเซลล์ของแบบจำลอง

6) เชื่อมต่อแบบจำลอง SWAT และ MODFLOW โดยใช้ไฟล์ (*.cio) และไฟล์ (*.nam)



7) กำหนดแบบจำลองควบน้ำฝน - น้ำท่า - น้ำบาดาล



8) ผลการคำนวณหลังจากเชื่อมแบบจำลองน้ำผิวดิน – น้ำบาดาล

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	SWGW (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	GW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (mm)
1	0.00	0.00	0.00	0.67	0.06	0.00	0.00	174.55	464.15	0.51	1.40	0.61	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.66	0.06	0.00	0.00	173.59	463.56	1.02	3.32	0.61	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.66	0.06	0.00	0.00	173.12	462.97	0.53	1.91	0.60	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.65	0.06	0.00	0.00	172.71	462.39	0.46	1.79	0.59	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.64	0.06	0.00	0.00	172.25	461.82	0.51	2.07	0.58	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.64	0.06	0.00	0.00	171.87	461.26	0.42	1.74	0.58	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.63	0.07	0.00	0.00	171.60	461.04	0.32	1.33	0.57	0.00
8	60.70	27.93	0.29	2.90	0.00	14.55	0.00	186.57	472.34	0.78	0.88	28.85	0.57
9	21.10	4.40	0.40	1.87	0.22	13.97	0.00	187.56	484.83	0.56	0.63	8.11	0.00
10	0.00	0.00	0.29	1.14	0.10	1.98	0.00	184.11	486.03	1.52	2.29	1.86	0.00
11	0.00	0.00	0.21	1.08	0.04	0.78	0.00	181.92	485.92	1.47	2.99	1.31	0.00
12	28.20	7.67	0.36	3.19	0.00	13.54	0.00	187.17	496.37	0.28	0.32	10.61	0.09
13	49.50	22.82	0.58	4.61	0.01	21.95	0.00	189.24	513.92	0.36	0.41	26.72	0.36

ผลที่ได้จากการเชื่อมต่อแบบจำลอง จะได้ผลลัพธ์เพิ่มขึ้น 4 ส่วน ได้แก่

GWQ คือ ปริมาณการไหลของน้ำบาดาล

SWGW คือ ปริมาณการเติมน้ำในแม่น้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล

GW คือ ปริมาณน้ำบาดาล

WATER YIELD คือ ปริมาณน้ำในลำน้ำ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล	นายจිරพงษ์ เหล่าน้ำใส
เกิดวันที่	15 มีนาคม พ.ศ. 2534
สถานที่เกิด	จังหวัดร้อยเอ็ด
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2556)
ประวัติการทำงาน	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ ศูนย์ป้องกันวิกฤติน้ำ กรมทรัพยากรน้ำ (2559-ปัจจุบัน)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช) (2/2558)