

ผลงานเรื่องที่ 1

การประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อวิเคราะห์บัญชีน้ำ (Water Accounting) ในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวง (พ.ศ. 2566)

โดย

นายกฤษฎา นาแหลม
ตำแหน่งนักอุทกวิทยาปฏิบัติการ
(ตำแหน่งเลขที่ 5435)
ฝ่ายติดตามและวิเคราะห์สถานการณ์น้ำ
ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนล่าง
สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา

ผลงานนี้เป็นเอกสารประกอบการประเมินผลงาน
เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักอุทกวิทยาชำนาญการ
(ตำแหน่งเลขที่ 5435)
ฝ่ายติดตามและวิเคราะห์สถานการณ์น้ำ
ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนล่าง
สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา

คำนำ

ลุ่มน้ำห้วยหลวงเป็นลุ่มน้ำที่มักจะประสบกับปัญหาอุทกภัยในฤดูฝนและปัญหาขาดแคลนน้ำในช่วงฤดูแล้ง จึงได้มีการศึกษาและประเมินน้ำท่าและจำแนกกิจกรรมการใช้น้ำเพื่อให้ทราบถึงภาพรวมการใช้น้ำในลุ่มน้ำ จึงได้นำแบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) มาประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวงโดย ซึ่งเป็นแบบจำลองปริมาณน้ำฝนเป็นปริมาณน้ำท่า โดยจะจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาในลุ่มน้ำห้วยหลวง ประกอบด้วยการไหลของน้ำท่า การซึมลงสู่ดิน การระเหย และการใช้ทรัพยากรน้ำในกิจกรรมต่าง ๆ โดยอาศัยข้อมูลการใช้ที่ดินประกอบในการวิเคราะห์ และเพื่อให้ทราบถึงภาพรวมของการใช้น้ำในพื้นที่จึงได้มีการนำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง มาจัดทำบัญชีน้ำ (Water Accounting) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในลุ่มน้ำ ปริมาณการสูญเสียน้ำและการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ในลุ่มน้ำห้วยหลวง ใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนและตัดสินใจในการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำให้มีประสิทธิภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว และยังสามารถนำองค์ความรู้ไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้แบบจำลองในการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำอื่น ๆ

กฤษฎา นาแหลม
ธันวาคม 2567

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
ส่วนที่ 1 ข้อมูลบุคคล/ตำแหน่ง	
ชื่อผู้ขอประเมิน/ตำแหน่งปัจจุบัน/หน้าที่ความรับผิดชอบของตำแหน่งปัจจุบัน ตำแหน่งที่จะแต่งตั้ง/หน้าที่ความรับผิดชอบของตำแหน่งที่จะแต่งตั้ง	1
ส่วนที่ 2 ผลงานที่เป็นผลการปฏิบัติงานหรือผลสำเร็จของงาน	
1. เรื่องนำเสนอ	1
2. ระยะเวลาที่ดำเนินการ	1
3. ความรู้ ความชำนาญงาน หรือความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน	1
4. สรุปสาระสำคัญ ขั้นตอนการดำเนินการ และเป้าหมายของงาน	14
5. ผลสำเร็จของงาน (เชิงปริมาณ/คุณภาพ)	30
6. การนำไปใช้ประโยชน์/ผลกระทบ	30
7. ความยุ่งยากและซับซ้อนในการดำเนินการ	31
8. ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการ	31
9. ข้อเสนอแนะ	31
10. การเผยแพร่ผลงาน	31
11. ผู้มีส่วนร่วมในผลงาน	31
เอกสารอ้างอิง	33

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายชื่อสถานีตรวจวัดปริมาณน้ำฝน	17
2	ประเภทการใช้ที่ดินในลุ่มน้ำห้วยหลวง	21
3	ชนิดดินลุ่มน้ำห้วยหลวง	23
4	ชั้นข้อมูลความลาดชันในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวง	23
5	ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดจากการปรับเทียบแบบจำลอง (Calibration) SWAT-CUP	26
6	ผลการปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง SWAT กับข้อมูลน้ำท่าสถานี Kh.103	26
7	สมดุลน้ำระหว่างปี พ.ศ. 2554-2565	29

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	ขอบเขตของลุ่มน้ำ	2
2	วัฏจักรอุทกวิทยาซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ	3
3	การจัดลำดับลำน้ำของลุ่มน้ำ	4
4	ประเภทข้อมูลเชิงพื้นที่ในลักษณะต่าง ๆ	7
5	องค์ประกอบของบัญชีน้ำ	11
6	ผังการดำเนินงาน	15
7	แผนที่แสดงพื้นที่ศึกษา	16
8	กราฟ Double-Mass Curve สถานี PH170211 และสถานี 360005	17
9	กราฟ Double-Mass Curve สถานี 534004 สถานี 534201 และสถานี 360005	18
10	กราฟน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือน สถานี Kh.103	19
11	กราฟการระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง	19
12	ข้อมูลแบบจำลองความสูง (DEM) พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวง	20
13	การใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำห้วยหลวง	21
14	ชนิดดินในลุ่มน้ำห้วยหลวง	22
15	การนำเข้าข้อมูลสภาวะอากาศในแบบจำลอง SWAT	24
16	การกำหนดช่วงเวลาประมวลผลแบบจำลอง SWAT	25
17	การแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าก่อนปรับแก้พารามิเตอร์	25
18	การปรับเทียบแบบจำลองด้วยโปรแกรม SWAT-CUP	26
19	ผลการปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง SWAT กับข้อมูลน้ำท่าสถานี Kh.103	27
20	กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการจำลองและค่าของการตรวจวัด ช่วงปี พ.ศ. 2554-2565	27
21	การแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าหลังปรับแก้พารามิเตอร์	28
22	กราฟน้ำฝน-น้ำท่าเฉลี่ย ปี พ.ศ. 2554-2565	28
23	บัญชีน้ำลุ่มน้ำห้วยหลวง (Water Accounting) ช่วงปี พ.ศ. 2554-2565	30

แบบการเสนอผลงาน
(ระดับชำนาญการ)

ส่วนที่ 1 ข้อมูลบุคคล/ตำแหน่ง

ชื่อผู้ขอประเมิน นายกฤษฎา นาแหลม

◆ **ตำแหน่งปัจจุบัน** นักอุทกวิทยาปฏิบัติการ

หน้าที่ความรับผิดชอบของตำแหน่งปัจจุบัน

1. ติดตาม เฝ้าระวัง และวิเคราะห์สถานการณ์น้ำ คุณภาพน้ำ เพื่อให้ได้ผลการประเมินและคาดการณ์สถานการณ์น้ำท่วม ภัยแล้ง หรือผลกระทบด้านอื่น ๆ สำหรับใช้ข้อมูลประกอบในการแจ้งเตือนภัย ระดับพื้นที่

2. ศึกษา ออกแบบ พัฒนา และจัดทำระบบฐานข้อมูล ระบบสารสนเทศข้อมูลอุทกวิทยาในระดับพื้นที่ โดยแสดงข้อมูลผ่านเว็บไซต์ของศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาค เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจสามารถนำข้อมูลในระดับพื้นที่ไปใช้ประโยชน์

3. จัดทำรายงานข้อมูล สถานการณ์น้ำฝน น้ำท่า สภาพอากาศ คุณภาพน้ำ และแนวโน้ม เพื่อให้กรมชลประทานและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำไปใช้ประโยชน์และเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจด้านการบริหารจัดการน้ำในระดับพื้นที่ โดยแสดงข้อมูลผ่านเว็บไซต์ของศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาค เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจสามารถนำข้อมูลในระดับพื้นที่ไปใช้ประโยชน์

4. สนับสนุนข้อมูลสถานการณ์น้ำฝน สภาพอากาศ คุณภาพน้ำ และให้คำแนะนำด้านอุทกวิทยา ในระดับพื้นที่แก่หน่วยงานและบุคคลที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นไปตามเป้าหมายและผลสัมฤทธิ์ที่กำหนด

5. ปฏิบัติงานร่วมกับ หรือสนับสนุนการปฏิบัติงานของหน่วยงานอื่นที่เกี่ยวข้องหรือได้รับมอบหมาย เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด

◆ **ตำแหน่งที่จะแต่งตั้ง** นักอุทกวิทยาชำนาญการ

หน้าที่ความรับผิดชอบของตำแหน่งที่จะแต่งตั้ง

เช่นเดียวกับหน้าที่ความรับผิดชอบของตำแหน่งปัจจุบัน

ส่วนที่ 2 ผลงานที่เป็นผลการปฏิบัติงานหรือผลสำเร็จของงาน

1. เรื่อง การประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อวิเคราะห์บัญชีน้ำ (Water Accounting) ในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวง (พ.ศ. 2566)

2. ระยะเวลาการดำเนินการ มกราคม – มีนาคม 2566

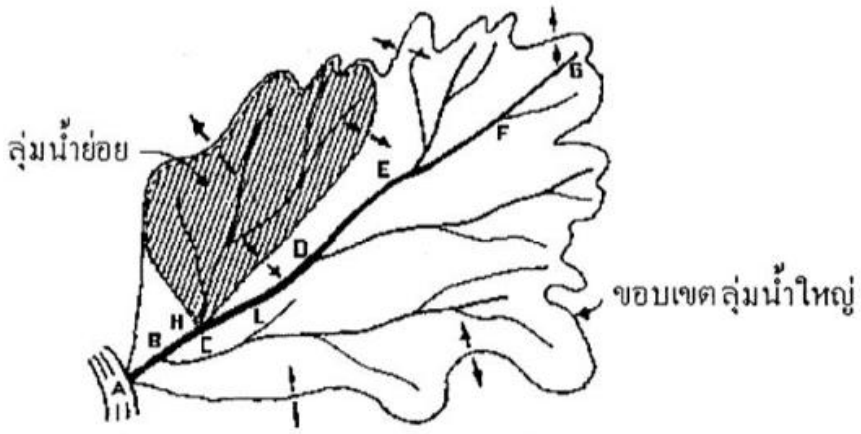
3. ความรู้ ความชำนาญงาน หรือความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน

การประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อวิเคราะห์บัญชีน้ำ (Water Accounting) ในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวง (พ.ศ. 2566) ใช้ความรู้ทางวิชาการ ดังนี้

3.1 ลุ่มน้ำและการจัดการลุ่มน้ำ

3.1.1) ลุ่มน้ำ (Watershed) หมายถึง พื้นที่ทั้งหมดซึ่งน้ำท่าผิวดิน (Surface Runoff) ที่เกิดจากฝนที่ตกลงบนพื้นที่นี้จะไหลออกสู่ทางออก โดยนัยนี้ลุ่มน้ำจึงเกี่ยวข้องกับทางออกอันใดอันหนึ่งโดยเฉพาะ ตัวอย่างเช่นจุด A ใน**รูปที่ 1** คือ ทางออกจุดสุดท้ายของลุ่มน้ำที่กำหนดให้ ขณะที่จุด H

เป็นทางออกของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย เส้นแบ่งเขตลุ่มน้ำเรียกว่าสันปันน้ำ (Watershed Divide) ซึ่งเป็นเส้นที่วิ่งไปตามเส้นแนวสูงสุดของพื้นที่ ฝนที่ตกในพื้นที่ที่อยู่นอกสันปันน้ำจะไหลลงสู่ลุ่มน้ำอื่น ทางออก (Point of Concentration) ยิ่งอยู่ทางด้านท้ายน้ำมากขึ้นจะมีลำน้ำสาขาไหลมารวมกันมากขึ้น และขนาดของพื้นที่ลุ่มน้ำจะมากขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 1 ขอบเขตของลุ่มน้ำ
ที่มา : วราวุธ (2545)

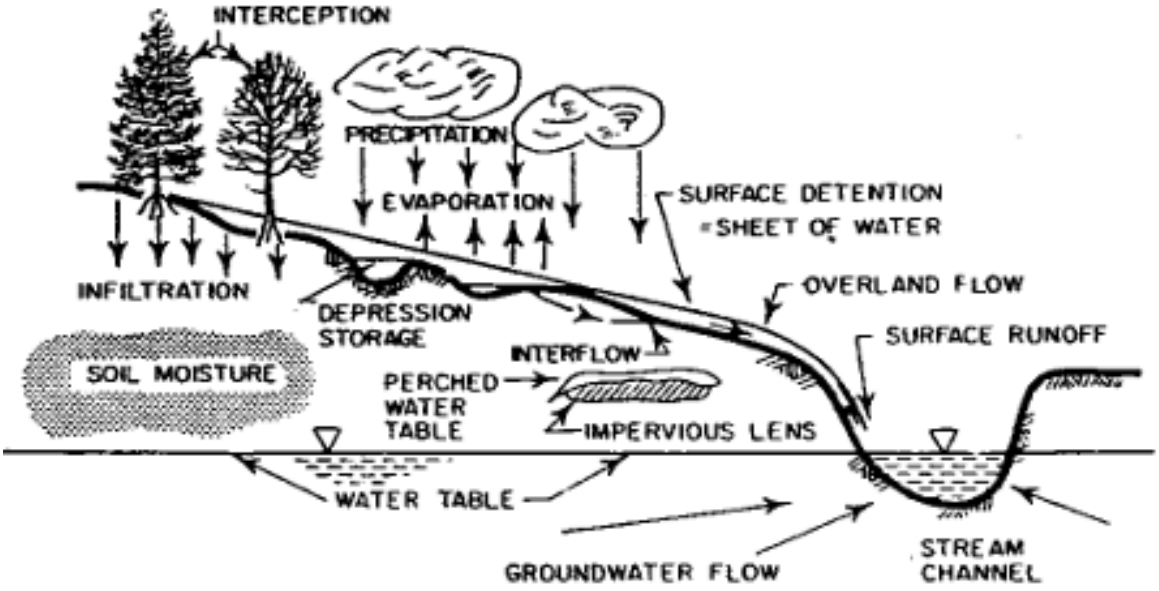
3.1.2) การจัดการลุ่มน้ำ หมายถึง การจัดการพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งที่มีขอบเขตที่ชัดเจน เพื่อให้ความสามารถเอื้ออำนวยน้ำที่ดี โดยให้มีปริมาณที่เพียงพอ คุณภาพดีและมีการไหลสม่ำเสมอตลอดปี และป้องกันการกัดเซาะพังทลายของดิน รวมทั้งการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประชาชนที่อยู่ในเขตลุ่มน้ำให้ดีขึ้น โดยการส่งเสริมและพัฒนาการใช้ประโยชน์ทรัพยากรต่าง ๆ ในการดำรงชีพ บนพื้นฐานของการอนุรักษ์ทรัพยากรดินและน้ำแบบยั่งยืนถือได้ว่าการจัดการลุ่มน้ำ เป็นแนวความคิดดำเนินการเกี่ยวกับการจัดการแหล่งน้ำตั้งแต่น้ำฝนหยดแรกที่ตกลงมาสู่พื้นที่ลุ่มน้ำ แล้วถูกซับไว้ตาม ต้น ใบ ดอก ราก ผล และซากพืชตามผิวดิน รวมทั้งการที่ดินดูดซับน้ำเอาไว้แล้วไหลลงสู่พื้นที่ตอนล่างไปตามแม่น้ำลำธาร ตลอดจนส่วนที่น้ำจะสูญเสียจากลุ่มน้ำ โดยกระบวนการคายระเหยและรั่วไหลจากลุ่มน้ำ ซึ่งการดำเนินการนั้น ผู้จัดการจะต้องทำให้น้ำมีใช้ตลอดเวลา โดยมีปริมาณคุณภาพและช่วงการไหลตามความเหมาะสม สิ่งที่ควรคำนึงถึงอย่างยิ่งในการจัดการลุ่มน้ำ ได้แก่

1) การสูญเสียน้ำให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ได้น้ำที่มีปริมาณมากพอตามความต้องการ เช่น การลดการสูญเสียจากการระเหยของน้ำตามแหล่งน้ำผิวดิน หรือจากการที่ต้นไม้ดูดซับน้ำไว้สำหรับการคายน้ำของพืชคลุมดินบางชนิด เป็นต้น

2) ต้องให้มีน้ำไหลอยู่ในลำน้ำตลอดเวลา โดยปกติแล้วปริมาณน้ำมักจะมากในฤดูฝน และขาดแคลนในฤดูแล้ง การจัดการลุ่มน้ำที่ทำให้ปริมาณและช่วงการไหลของน้ำสม่ำเสมอตลอดปี นับเป็นเป้าหมายของการจัดการลุ่มน้ำ

3) การใช้ทรัพยากรภายในลุ่มน้ำจะต้องทำด้วยความระมัดระวัง ถูกต้องตามหลักวิชาการ และไม่ฟุ่มเฟือยจนเกินไป เพราะน้ำจะไหลลงสู่ที่ต่ำโดยขณะที่ไหลจะเกิดการพัดพาสิ่งเจือปนต่าง ๆ ลงสู่ที่ราบ ถ้าเกิดความเสื่อมโทรมขึ้นในทรัพยากรลุ่มน้ำชนิดใดชนิดหนึ่ง ก็ย่อมจะส่งผลกระทบไปถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ของน้ำด้วย (สุวิทย์, 2547)

3.2 วัฏจักรของอุทกวิทยา (Hydrological Cycle) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งพิจารณาจากการเคลื่อนที่การสูญเสีย และการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของน้ำบนผิวโลก กระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรได้แสดงให้เห็นใน**รูปที่ 2**



รูปที่ 2 วัฏจักรอุทกวิทยาซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ
ที่มา: สันติ (ม.ป.ป.)

เมื่อไอน้ำในบรรยากาศมีปริมาณมากก็จะตกลงสู่พื้นโลกในรูปของฝน หิมะ น้ำค้าง ลูกเห็บ ฯลฯ ซึ่งเรารวมเรียกว่าน้ำจากอากาศ (Precipitation) น้ำส่วนหนึ่งจะตกลงสู่ทะเลมหาสมุทรและแม่น้ำลำธารโดยตรง อีกส่วนหนึ่งตกลงสู่พื้นแผ่นดิน น้ำส่วนนี้บางส่วนจะตกค้างตามใบไม้ใบหญ้าและต้นพืชที่ขึ้นปกคลุมพื้นแผ่นดิน (Interception) และเมื่อได้รับแสงแดดก็จะกลายเป็นไอระเหยขึ้นสู่บรรยากาศ (Evaporation)

ส่วนที่ตกลงสู่พื้นดิน จะซึมผ่านผิวดิน (Infiltration) และซึมลึกลงไปใต้ดิน (Percolation) ปริมาณน้ำความชื้นในดินบริเวณใกล้ผิวดินจะกลับขึ้นสู่บรรยากาศ โดยการระเหยและการคลายไอน้ำของพืช (Transpiration) น้ำที่ซึมลึกลงไปใต้ดินจะไปสู่แหล่งน้ำใต้ดิน (Groundwater Resource) ซึ่งอาจจะถูกดูดมาใช้โดยพืชหรือไหลขึ้นสู่ผิวดินในรูปของน้ำพุ (Spring) หรือไหลออกสู่แม่น้ำลำธารและในที่สุดก็ระเหยสู่อากาศ

ถ้าปริมาณน้ำที่ตกลงจากบรรยากาศสู่พื้นดินมีปริมาณมาก จะเกิดมีน้ำบางส่วนไหลไปตามผิวดินซึ่งเรียกว่า Overland Flow ไหลลงสู่แม่น้ำลำธาร และต่อไปถึงทะเลและมหาสมุทร และในที่สุดก็จะมีการระเหยของน้ำจากแหล่งน้ำดังกล่าวสู่บรรยากาศอีกเช่นกัน

ผืนแผ่นดินจะมีหลุมบ่อหรือแอ่งซึ่งสามารถ เก็บปริมาณน้ำได้บางส่วน น้ำส่วนดังกล่าวจะเรียกว่า Depression Storage ซึ่งจะกลับขึ้นสู่อากาศโดยการระเหย จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ตลอดเวลาที่น้ำอยู่ในขั้นตอนต่าง ๆ น้ำจะมีการกลับคืนสู่บรรยากาศโดยการระเหย ฉะนั้นวัฏจักรของอุทกวิทยาจะไม่มีการเริ่มต้นและสิ้นสุด แต่อาจมีการผันแปรตามปริมาณน้ำและความถี่ของการเกิด ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ที่ควบคุมในแต่ละกระบวนการ (สันติ, ม.ป.ป.)

3.3 โครงข่ายลุ่มน้ำ (Stream Networks)

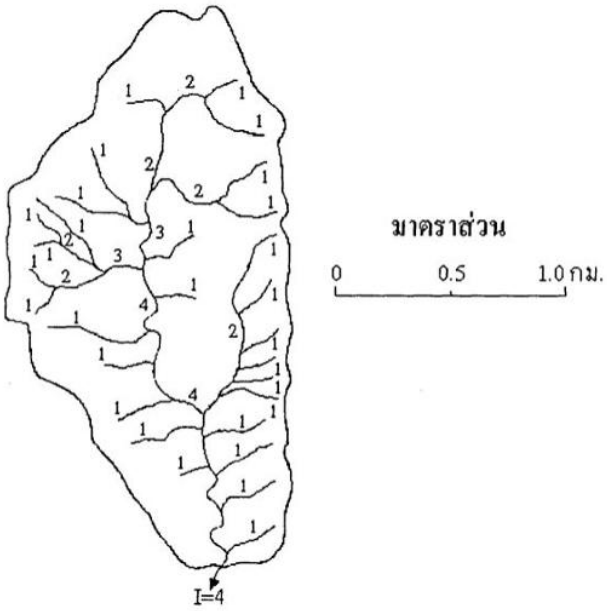
การจัดการลำดับในระบบโครงข่ายลำน้ำ ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน (Number) และความยาว (Length) ของลำน้ำกับลำดับ (Order) ของลำน้ำตาม**รูปที่ 3** โดยมีรายละเอียดได้แก่

1) ลำน้ำที่เล็กที่สุดในลุ่มน้ำคือลำน้ำลำดับที่ 1 ซึ่งปกติจะมีน้ำไหลเฉพาะช่วงที่มีฝนตก

2) ลำน้ำลำดับที่ 1 สองลำน้ำหรือมากกว่า ไหลมารวมตัวกัน จะเกิดลำน้ำลำดับที่ 2 ในทำนองเดียวกันลำน้ำลำดับที่ 2 ตั้งแต่สองลำน้ำขึ้นไป ไหลมารวมตัวกันจะเกิดลำน้ำลำดับที่ 3 หรือโดยทั่วไปอาจกล่าวได้ว่าลำน้ำลำดับ i ตั้งแต่ 2 ลำดับขึ้นไปไหลมารวมกันจะเกิดลำน้ำลำดับ i + 1

3) ลำน้ำที่เกิดจากลำน้ำที่มีลำดับต่ำกว่า ไหลไปรวมตัวกับลำน้ำที่มีลำดับสูงกว่า จะมีลำดับเท่ากับลำน้ำที่สูงกว่า เช่น ลำดับที่ 1 ร่วมกับลำดับที่ 2 จะมีลำดับเท่ากับ 2

4) ลำดับของลุ่มน้ำจะกำหนดตามลำดับของลำน้ำที่ระบายน้ำออกสู่ทางออก (Outlet) ซึ่งก็คือลำดับที่สูงที่สุดในลุ่มน้ำและกำหนดให้เท่ากับ I



รูปที่ 3 การจัดลำดับลำน้ำของลุ่มน้ำ
ที่มา : วราวุธ (2545)

3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อน้ำท่าในลำธาร

น้ำท่าในลำธารเกิดขึ้นจากปริมาณฝนที่แปรสภาพแล้ว 3 ลักษณะ ได้แก่ น้ำไหลผิวหน้าดิน (Surface Flow) น้ำไหลภายในชั้นดิน (Interflow, Subsurface Flow) และน้ำใต้ดิน (Groundwater, Baseflow, Dry-Weather Flow) โดยธรรมชาติ น้ำที่ไหลในลำธารไม่สามารถแยกออกจากกันได้ชัดเจนและยากที่จะตรวจวัดได้ อย่างไรก็ตาม สิ่งที่มีอิทธิพลต่อน้ำทั้งสามส่วน ในระดับลุ่มน้ำ มี 3 ปัจจัยหลัก ดังนี้

3.4.1 ลักษณะอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการระเหยน้ำ ความเร็วลม และโดยเฉพาะฝน มีผลต่อน้ำไหลในลำธารมากสามารถแยกพิจารณา ได้แก่ ปริมาณฝน ความหนักเบาหรือความเข้มของฝน ความยาวนานของฝนที่ตก การกระจายของน้ำฝน ปริมาณฝนที่ตกลงบนผิวลำน้ำโดยตรง สำหรับปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการระเหยน้ำ และความเร็วลมนั้นต่างมีส่วนช่วยเพิ่มการระเหยน้ำได้ มีผลให้ระดับของน้ำในลำธารลดลงได้บ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งฤดูแล้ง แม้จะมีฝนตกหนักจนเกิดน้ำไหลบ่าหน้าดินก็ตามแต่ความร้อนของอากาศ อัตราการระเหยน้ำ ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ช่วยให้น้ำฝนที่ตกลงมาถูกเผาผลาญเป็นไอน้ำสู่บรรยากาศได้มาก

3.4.2 ลักษณะภูมิประเทศ สภาพภูมิประเทศของพื้นที่ลุ่มน้ำรวมไปถึงสภาพพื้นผิวดินที่แตกต่างกันไป ต่างมีผลต่อการไหลของน้ำในลำธาร ได้แก่ ความลาดชันของพื้นที่และความลาดชันของลำธาร ขนาดและรูปแบบการระบายน้ำของลำธาร ทิศทางการไหลของน้ำ ชนิดของดินและความสูงจากระดับน้ำทะเล

3.4.3 กิจกรรมการใช้ที่ดิน การสร้างถนนหรือทางรถไฟบนพื้นที่ราบ มักมีการก่อสร้างโดยไม่คำนึงถึงผลกระทบที่ตามมา ทำให้น้ำที่เคยไหลบ่าหน้าดินในทุ่งนาต้องไหลผ่านได้เฉพาะบริเวณช่องสะพานหรือท่อระบายน้ำขนาดแคบ ๆ เท่านั้น ทำให้น้ำไม่สามารถไหลได้ตามปกติ ส่วนน้ำที่รอการระบายนั้นอาจทำให้เกิดอุทกภัยขึ้นได้ ถนนบางแห่งกลายเป็นเขื่อนกั้นน้ำ ทำให้เกิดปัญหาน้ำท่วมขัง สำหรับการก่อสร้างถนนบนภูเขาทำให้เกิดปัญหาตะกอนถูกพัดพาลงสู่ลำธารจำนวนมาก สร้างผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในลำธาร อีกทั้งตะกอนเหล่านี้ อาจทำให้ลำธารตื้นเขินได้

3.5 สมดุลน้ำ (Water Balance)

ถ้าพิจารณาการหมุนเวียนตามวัฏจักรของน้ำ จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำไหลเข้า (Inflow) และ น้ำไหลออก (Outflow) ในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง สำหรับช่วงระยะเวลาหนึ่ง ๆ ซึ่งอาจเขียนความสัมพันธ์นี้ออกมาในรูปของสมการที่เรียกว่า สมการสมดุลน้ำ ซึ่งหมายถึงการศึกษาปริมาณของน้ำฝนที่แปรสภาพเป็นปริมาณน้ำในลักษณะต่าง ๆ ของวัฏจักรน้ำ โดยศึกษาไปที่สัดส่วนของน้ำฝน (P) ที่ตกลงในพื้นที่ ซึ่งจะได้ปริมาณฝนในลักษณะคือ ปริมาณฝนที่ถูกเก็บกักไว้ในดิน (S) ปริมาณฝนที่คายระเหยกลับไปสู่บรรยากาศ (Et) และปริมาณฝนที่เป็นน้ำท่า (Q)

สมดุลน้ำจะวิเคราะห์ว่ามีมากน้อยเพียงใด โดยการศึกษานี้มักใช้ช่วงเวลาศึกษานานเพื่อให้เป็นตัวแทนของสมดุลน้ำของพื้นที่นั้นได้แน่นอน และเป็นลักษณะหรือพฤติกรรมของพื้นที่เป็นการศึกษาเชิงปริมาณฝนที่แปรสภาพไปในรูปต่าง ๆ ตามวัฏจักรของน้ำ โดยวัดปริมาณน้ำไหลเข้า ปริมาณน้ำไหลออก การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกักเก็บ สามารถเขียนเป็นสมการสมดุลน้ำ ได้ดังสมการที่ 1

ปริมาณน้ำไหลเข้า = ปริมาณน้ำไหลออก ± การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกักเก็บ

$$Et = \mathrm{P} - \mathrm{Q} \pm \Delta S \qquad (1)$$

เมื่อ Et คือ การคายระเหย (มิลลิเมตร)
Q คือ ปริมาณน้ำท่าในลำธาร (มิลลิเมตร)
P คือ ปริมาณฝน (มิลลิเมตร)
S คือ ความชื้นในดิน (มิลลิเมตร)

3.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และจัดทำแผนที่ต่าง ๆ

3.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเบื้องต้น คือขนาดพื้นที่รับน้ำฝน (DA) ซึ่งใช้การวิเคราะห์จากโปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เป็นการพัฒนาด้านการทำแผนที่ด้วยระบบอัตโนมัติ การนำเข้าข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การนำเสนอข้อมูลในสหวิทยาการต่าง ๆ เช่น การทำแผนที่ขอบเขตโครงการ การสำรวจและการทำแผนที่เพื่อพัฒนางานต่าง ๆ โดยการนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ในรูปแบบเชิงพื้นที่ ซึ่งแต่ละพื้นที่ก็จะประกอบไปด้วยฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์หรือตัดสินใจในการแก้ไขหรือวางแผนการบริหารจัดการ (สุเพชร, 2555)

3.6.2 ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ที่เปรียบเสมือนเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ประมวลผลจากข้อมูลที่ได้นำเข้าและจัดเตรียมไว้อย่างเป็นระบบ เป็นกระบวนการทำงานเกี่ยวกับข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) ด้วยระบบคอมพิวเตอร์โดยการกำหนดข้อมูลเชิงบรรยายหรือข้อมูลคุณลักษณะ (Attribute Data)

และสารสนเทศ เช่น ที่อยู่ บ้านเลขที่ หรือความสูงของภูมิประเทศ ที่มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งในเชิงพื้นที่ (Spatial Data) เช่น ตำแหน่งบ้าน ถนน แม่น้ำ หรือตำแหน่งในภูมิประเทศ เป็นต้น ในรูปแบบของ ตารางข้อมูล หรือฐานข้อมูล รายละเอียดจะได้อธิบายในเอกสารองค์ความรู้ของการใช้โปรแกรมสารสนเทศในการสร้างแบบจำลองความสูงสามมิติของภูมิประเทศ ความสูงต่ำของภูมิประเทศมีบทบาทสำคัญเป็นพื้นฐานของศาสตร์แขนงอื่น ๆ เช่น สัณฐานวิทยา อุทกวิทยา และกระบวนการทางนิเวศวิทยาต่าง ๆ ที่เกิดอยู่บนผิวโลก โปรแกรมประยุกต์ที่นำมาใช้ศึกษาวิจัยมักจะต้องพึ่งพาแบบจำลองความสูง (Digital Elevation Model: DEM) สำหรับใช้เป็นตัวแทนพื้นผิวต่อเนื่องที่ซับซ้อน เพื่อการวิเคราะห์ภูมิประเทศ เทคนิคต่าง ๆ ที่นำมาใช้แสดงจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของแต่ละพื้นที่ กระบวนการสร้างแบบจำลองพื้นผิวสามมิติโดยระบบภูมิสารสนเทศ มีองค์ประกอบ 5 ประการ

1) การสำรวจหรือสกัดข้อมูลความสูงของพื้นผิวจากภูมิประเทศจริง (Data Capture) เป็นการรวบรวมตำแหน่งทั้งทางราบและความสูงของภูมิประเทศ สามารถทำได้หลายวิธี และมีหลายเทคโนโลยีที่สามารถทำได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยในหลาย ๆ อย่าง เช่น ความละเอียดถูกต้อง ปริมาณที่ต้องการ ตลอดจนปัจจัยภายนอก เช่น งบประมาณด้วยเช่นกัน

2) การสร้างแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ (DEM Generation) ในระบบภูมิสารสนเทศการแสดงพื้นผิวความสูงของภูมิประเทศสามารถทำได้หลายแบบขึ้นอยู่กับปัจจัย เช่น ปริมาณข้อมูล วิธีการที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ หรือวัตถุประสงค์ในการแสดงผล เป็นต้น

3) การแสดงผลในระบบ (Visualization) เป็นการนำข้อมูลเชิงตำแหน่งมาประมวลผลร่วมกับแบบจำลองความสูงของภูมิประเทศ และแสดงผลการแสดงผลในรูปแบบสองมิติหรือสามมิติ ขึ้นกับการกำหนดวิธีการแสดงผลและความสมบูรณ์ของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ

4) การวิเคราะห์ตีความแบบจำลอง (Interpretation) เป็นการนำข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล นำมาผ่านกระบวนการวิเคราะห์ ตีความ โดยวิธีการหรือใช้แบบจำลองที่เหมาะสมตามเงื่อนไขและข้อจำกัดที่กำหนด เช่น การวิเคราะห์เส้นทางน้ำ การวิเคราะห์ดินตัดดินถม การวิเคราะห์ภูมิประเทศ เป็นต้น

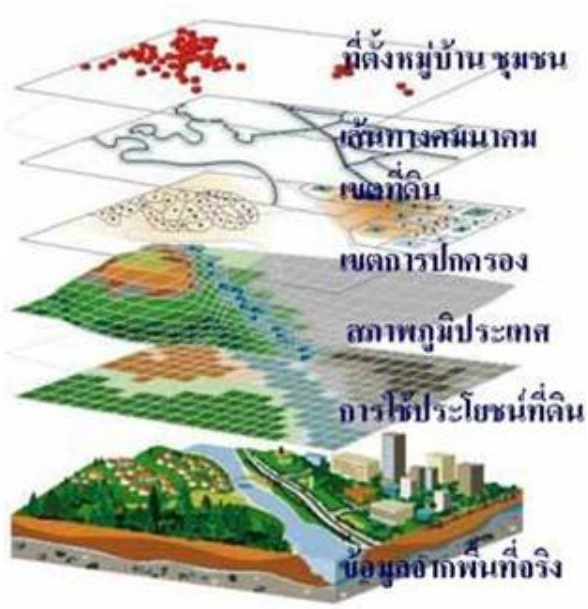
5) การนำไปประยุกต์ใช้งาน (Applications) เป็นการนำผลที่ได้จากส่วนต่าง ๆ ไปใช้ในการปฏิบัติงาน วางแผนต่าง ๆ หรือบริหารจัดการ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ผลสำเร็จของการใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในบางครั้งผู้เชี่ยวชาญต้องอาศัยการทดลองใช้งาน เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าแบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ทำให้ในบางครั้งอาจจะต้องนำผลลัพธ์จากแบบจำลองมากกว่าหนึ่งแบบจำลองมาเปรียบเทียบผลจากการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เพื่อให้ทราบว่าวิธีการใดมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลมากที่สุด

3.6.3 ข้อมูลเชิงตำแหน่งในระบบภูมิสารสนเทศ ได้แก่

1) ข้อมูลในระบบจะประกอบด้วยข้อมูลในสองรูปแบบหลักคือ ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) และข้อมูลเชิงคุณลักษณะ (Attribute Data)

ก) ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) มีรูปลักษณ์ใน 3 ลักษณะ คือ จุด (Point), เส้น (Line) และพื้นที่รูปปิด (Polygon) เพื่อใช้แทนลักษณะของสิ่งต่าง ๆที่ปรากฏบนผิวโลกเช่น สถานที่แทนด้วยรูปแบบจุด เส้นถนน หรือทางน้ำ แทนด้วยรูปแบบเส้น พื้นที่ป่าไม้ ขอบเขตการปกครอง แทนด้วยรูปแบบของพื้นที่รูปปิด เป็นต้น ตัวอย่างประเภทข้อมูลเชิงพื้นที่ลักษณะต่าง ๆ ดังแสดงใน**รูปที่ 4**

ข) ข้อมูลเชิงคุณลักษณะ เป็นข้อมูลที่ใช้อธิบายประกอบข้อมูลเชิงพื้นที่นั้น เช่น เป็นจำนวนตัวเลข คำอธิบาย ชื่อเรียก ตรรกศาสตร์ รหัส หรือแม้กระทั่งรูปภาพ ก็จัดได้ว่าเป็นข้อมูลเชิงคุณลักษณะประเภทหนึ่ง



รูปที่ 4 ประเภทข้อมูลเชิงพื้นที่ในลักษณะต่าง ๆ
ที่มา : https://www.gisthai.org/about-gis/gis.html

2) องค์ประกอบที่สำคัญการจัดทำแผนที่

ก) ชื่อแผนที่ (Title) บอกให้ทราบว่าเป็นแผนที่ เรื่องอะไร แสดงอะไร เพื่อจะได้ใช้ประโยชน์ได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ เช่น แผนที่แสดงแนวเขตของพื้นที่ต่าง ๆ แผนที่แสดงความหนาแน่นของประชากร แผนที่แสดงการใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น

ข) คำอธิบายสัญลักษณ์ (Legend) ใช้อธิบายความหมายของรายละเอียดของสิ่งต่าง ๆ บนพื้นผิวโลกที่แสดงลงบนแผนที่

ค) มาตราส่วน (Scale) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางบนแผนที่กับระยะทางในภูมิประเทศจริง ซึ่งเป็นข้อมูลที่บอกให้ผู้ใช้แผนที่ทราบว่า แผนที่นั้น ๆ ย่อส่วนมาจากของจริงในอัตราส่วนเท่าใด เช่น แผนที่มาตราส่วน 1:50,000 ระยะทางจริงในภูมิประเทศ 1 กิโลเมตร เมื่อเขียนลงแผนที่อาจจะเขียนย่อส่วนลงจาก 1 กิโลเมตร เป็น 2 เซนติเมตร เป็นต้น

ง) ทิศ (North Arrow) ในแผนที่จะระบุทิศเหนือไว้เสมอ เพื่อให้อ่านแผนที่ได้ง่ายขึ้น ในกรณีที่แผนที่ไม่ได้ระบุทิศไว้ให้เข้าใจว่าเมื่อหันหน้าเข้าหาแผนที่ ด้านบนของแผนที่คือทิศเหนือ ด้านล่างเป็นทิศใต้ ด้านขวามือเป็นทิศตะวันออกและด้านซ้ายมือเป็นทิศตะวันตก

จ) ระบบพิกัด (Coordinate System) เป็นระบบที่สร้างขึ้นสำหรับใช้อ้างอิงในการกำหนดตำแหน่งหรือบอกตำแหน่งพื้นโลกจากแผนที่ มีลักษณ์เป็นตารางโครงข่ายที่เกิดจากการตัดกันของเส้นตรงสองชุดที่ถูกกำหนดให้วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ และแนวตะวันออก-ตะวันตก ตามแนวของจุดศูนย์กำเนิด (Origin) ที่กำหนดขึ้น ค่าพิกัดที่ใช้อ้างอิงในการบอกตำแหน่งต่าง ๆ จะใช้ค่าของหน่วยที่นับออกจากจุดศูนย์กำเนิดเป็นระยะเชิงมุม (Degree) หรือเป็นระยะทาง (Distance) ไปทางเหนือหรือใต้และตะวันออกหรือตะวันตก ตามตำแหน่งของตำบลที่ต้องการหาค่าพิกัดที่กำหนดตำแหน่งต่าง ๆ จะถูกเรียกอ้างอิงเป็นตัวเลขในแนวตั้งและแนวนอนตามหน่วยวัดระยะ

3.7 การประมาณค่าฝนที่ขาดหายไป

โดยทั่วไปแล้วข้อมูลปริมาณน้ำฝนเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการศึกษาด้านต่าง ๆ เช่น ด้านภูมิอากาศ ด้านอุทกวิทยา และการออกแบบระบบแหล่งน้ำ (Teegavarapu and Chandramouli, 2005) ด้านการเกษตร ด้านภัยพิบัติน้ำท่วม ภัยแล้ง ดินถล่ม เป็นต้น และควรเป็นข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่มีการบันทึกข้อมูลเป็นระยะเวลานาน และมีความสม่ำเสมอต่อเนื่อง เมื่อนำข้อมูลมาศึกษาจะได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ สะท้อนพฤติกรรมของฝนของพื้นที่นั้น ๆ ได้ดี ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝนมักประสบปัญหาเนื่องจากไม่สามารถบันทึกข้อมูลปริมาณน้ำฝนได้ตลอดเวลา ทำให้มีบางส่วนหรือบางช่วงเวลาที่ข้อมูลเกิดการขาดหายไปเป็นวัน เดือน หรือปี ซึ่งอาจมีหลายสาเหตุที่ทำให้เกิดการขาดหายของข้อมูล เช่น เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนเกิดการเสียหาย มีการเปลี่ยนตำแหน่งเครื่องวัดน้ำฝน การบันทึกข้อมูลของผู้บันทึกเป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่อง ฉะนั้นก่อนการนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ขาดหายมาวิเคราะห์ จึงต้องมีการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนที่ขาดหายไป เพื่อให้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่จะนำมาวิเคราะห์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นโดยการเติมช่องว่างข้อมูลหรือข้อมูลที่ขาดหายนั้นมีด้วยกันหลากหลายวิธี วิธีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ

การค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) เป็นค่าที่ได้จากการเฉลี่ยข้อมูลทั้งหมด ค่าเฉลี่ยเลขคณิตเหมาะที่จะนำมาใช้ เป็นค่ากลางของข้อมูล เมื่อข้อมูลนั้น ๆ ไม่มีค่าใดค่าหนึ่งหรือหลาย ๆ ค่าซึ่งสูงหรือต่ำกว่าค่าอื่น ๆ ที่เหลืออย่างผิดปกติหรือค่าเฉลี่ยเลขคณิต บางทีเรียกว่า “ตัวกลาง” (Mean) หรือ “ค่าเฉลี่ย” (Average) เป็นการวัดค่ากลางที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ กล่าวคือข้อมูลที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยในกรณีการประมาณค่าข้อมูลน้ำฝนที่ขาดหายไปจะนำวิธีค่าเฉลี่ยเลขคณิตมาใช้ เป็นวิธีที่นำค่าน้ำฝนมาทำการประมาณค่าข้อมูลน้ำฝนที่หายไป ดังสมการที่ 2

$$\hat{P} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n)}{n} \quad (2)$$

เมื่อ $P_{1,2,3,\ldots,n}$ คือ ค่าน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝนที่ทราบค่า (มิลลิเมตร)

$\hat{P}$ คือ ค่าน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝนที่ไม่ทราบค่า (มิลลิเมตร)

n คือ จำนวนสถานี

3.8 แบบจำลอง SWAT

Arnold et al. (1998) ได้พัฒนาเครื่องมือ Soil and Water Assessment Tool (SWAT) สำหรับการประเมินปริมาณน้ำท่า ปริมาณตะกอน และปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเกษตร ภายในพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่ ทำการจำลองทางอุทกวิทยาเพื่อวิเคราะห์วัฏจักรอุทกวิทยา โดยสามารถคำนวนเป็นรายวันต่อเนื่องตามระยะเวลาที่ยาวนานได้ โดยแบบจำลอง SWAT อาศัยข้อมูลเชิงกายภาพ มีส่วนประกอบหลักได้แก่ข้อมูลด้านภูมิอากาศ ด้านอุทกวิทยา ด้านอุณหภูมิ คุณสมบัติดิน ด้านการเจริญเติบโตของพืช ด้านธาตุอาหารพืช ด้านสารเคมีกำจัดศัตรูพืช ด้านแบคทีเรียและโรคพืช และด้านการจัดการที่ดิน

ในการประมาณค่าดัชนีบ่งชี้ความสมบูรณ์ของลุ่มน้ำ โดยแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย และภายในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยก็จะถูกแบ่งเป็นหน่วยจัดการอุทกวิทยา (Hydrologic Response Units, HRUs) ซึ่งเป็นการซ้อนทับกันของชั้นข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและการจัดการที่ดิน คุณสมบัติดินที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน (Gassman, 2007) การประมาณค่าทางอุทกวิทยาจะใช้หลักการทางด้านสมดุลของน้ำ โดยปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในดิน จะเท่ากับปริมาณน้ำที่ดินได้รับมาลบกับปริมาณน้ำที่ดินสูญเสียไป ปริมาณน้ำที่ดินได้รับมาประกอบไปด้วยปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำชลประทาน ส่วนปริมาณน้ำที่สูญเสียไป

ประกอบไปด้วยปริมาณน้ำไหลบ่า ปริมาณการและคายระเหยของน้ำ ปริมาณการซึมลึกลงไปใต้ดินของน้ำและปริมาณการไหลลงลำน้ำ ดังสมการที่ 3

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{suf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (3)$$

เมื่อ SW_t คือ ปริมาณน้ำในดินสุดท้าย (มิลลิเมตร)
SW_0 คือ ปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นในวันที่ i (มิลลิเมตร)
t คือ เวลา (วัน)
Q_{surf} คือ ปริมาณน้ำผิวดินที่ i (มิลลิเมตร)
E_a คือ ปริมาณการคายระเหยในวันที่ i (มิลลิเมตร)
W_{seep} คือ ปริมาณน้ำไหลซึมลงสู่ชั้นใต้ดินในวันที่ i (มิลลิเมตร)
Q_{qw} คือ ปริมาณน้ำใต้ดินที่ไหลกลับลงสู่ลำน้ำในวันที่ i (มิลลิเมตร)
R_{day} คือ ปริมาณฝนในวันที่ i (มิลลิเมตร)

การคำนวณปริมาณของน้ำท่าผิวดินในแบบจำลอง SWAT คำนวณจากปริมาณน้ำฝนรายวันโดยใช้วิธีการ Soil Conservation Service (SCS) Curve Number (CN) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่า CN (Curve Number) คือ คุณสมบัติทางอุทกวิทยาของดิน (Hydrologic Soil Group) สิ่งปกคลุม (Land Cover) สภาพอุทกวิทยา (Hydrologic Condition) การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use Classification) และเงื่อนไขความชื้นในดินเริ่มต้น (Antecedent Moisture Content: AMC)

ปัจจุบันในประเทศไทยมีหน่วยงานรัฐ หน่วยงานเอกชน และสถาบันทางการศึกษาหลายแห่ง เช่น กรมพัฒนาที่ดิน กรมทรัพยากรน้ำ คณะกรรมาธิการแม่น้ำโขง ได้นำเอาแบบจำลอง SWAT มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาค้นคว้าวิจัยหลากหลายด้าน เช่น ศึกษาเกี่ยวกับด้านทรัพยากรน้ำ ศึกษาเกี่ยวกับการชะล้างพังทลายของดินและการตกตะกอน การศึกษาผลกระทบการใช้ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รวมถึงใช้การประเมินความเสี่ยงภัยแล้ง น้ำท่วม และไฟป่า ดังนั้น แบบจำลอง SWAT จึงเป็นแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือและได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย เหมาะสำหรับนำมาศึกษาการประเมินปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำ

3.9 ดัชนีทางสถิติสำหรับประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง

3.9.1 ทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) คือ สัดส่วนที่พารามิเตอร์ อิสระ (X) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตาม (Y) ได้ โดย R^2 จะมีค่าคะแนนอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ ถ้าค่า $R^2 < 0.70$ ถึง 1.00 อยู่ในระดับดีมาก ค่า $R^2 < 0.60$ ถึง 0.70 อยู่ในระดับดี ค่า $R^2 < 0.50$ ถึง 0.60 อยู่ในระดับพอใช้ และค่า R^2 เท่ากับหรือน้อยกว่า 0.50 อยู่ในระดับแย่ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{j=1}^{n}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}}\right]^2 \quad (4)$$

เมื่อ i คือ ลำดับที่
n คือ จำนวนข้อมูล

O_i คือ ค่าจากการตรวจวัด
$\bar{O}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัดทั้งหมด
P_i คือ คาดจากแบบจำลอง
$\bar{P}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลแบบจำลองทั้งหมด

3.9.2 ทฤษฎี Nash - Sutcliffe Efficiency (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970) คือ ดัชนีที่นิยมใช้ในการ บอกค่าความแม่นยำของแบบจำลอง (Model Accuracy) หรือประสิทธิภาพ-ประสิทธิผลของแบบจำลอง (Model Performance) ในการคาดคะเนค่าที่ต้องการ สูตรการคำนวณหาค่า NSE สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 โดยมีเกณฑ์บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของผลการจำลองได้แก่ เมื่อค่า NSE < 0.75 ถึง 1.00 อยู่ในระดับดีมาก ค่า NSE < 0.65 ถึง 0.75 อยู่ในระดับดี ค่า NSE < 0.50 ถึง 0.65 อยู่ในระดับพอใช้ และค่า NSE เท่ากับหรือน้อยกว่า 0.50 อยู่ในระดับแย่

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

เมื่อ i คือ ลำดับที่
n คือ จำนวนข้อมูล
O_i คือ ค่าจากการตรวจวัด
$\bar{O}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัดทั้งหมด
P_i คือ คาดจากแบบจำลอง
$\bar{P}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลแบบจำลองทั้งหมด

3.10 แบบจำลอง SWAT-CUP

SWAT-CUP หรือ SWAT Calibration and Uncertainty Programs คือแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการค้นหาคำตอบพารามิเตอร์ความอ่อนไหวทางอุทกวิทยาที่เหมาะสม (Optimal Sensitivity Parameters) ที่ทำให้ผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าจาก SWAT มีความใกล้เคียงกับปริมาณน้ำท่าจากสถานีตรวจวัดที่ดีที่สุด ทดแทนวิธีการเดิมที่ใช้การลองผิด-ลองถูก หลักการทำงานของ SWAT-CUP จะเป็นการค้นหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิค Sequential Uncertainty Fitting version 2 (SUFI-2) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ต้องการจำนวนพารามิเตอร์ความอ่อนไหวน้อยที่สุด แต่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดและแสดงช่วงขอบเขตของผลลัพธ์พารามิเตอร์ความอ่อนไหวได้กว้างที่สุด ผลการคำนวณที่ได้จากเทคนิค SUFI-2 จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดและประเมินประสิทธิภาพ โดยใช้ดัชนีทางสถิติตรวจสอบความแม่นยำของผลลัพธ์

3.11 บัญชีน้ำ (Water Accounting)

การจัดทำบัญชีน้ำ (Water Accounting) เป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นโดยสถาบันการจัดการน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute, IWMI) มีเป้าหมายเพื่อทำความเข้าใจถึงกิจกรรมการใช้น้ำในด้านต่าง ๆ และเพื่อให้ทราบถึงแนวทางที่สามารถปรับปรุงในการใช้น้ำในแต่ละกลุ่มกิจกรรมต่าง ๆ ให้เกิดประโยชน์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ทราบถึงผลิตผลที่ได้จากน้ำในภาพรวม ทั้งนี้การจัดทำบัญชีน้ำจะพิจารณาจำแนกกิจกรรมการใช้น้ำต่าง ๆ โดยผนวกแนวความคิดทางด้านเศรษฐศาสตร์และทางการจัดการน้ำ เช่น สิทธิการใช้น้ำ ชนิดของผลประโยชน์จากการใช้น้ำเพิ่ม เข้ามาวิเคราะห์ (เอกสิทธิ์และบัญชา, 2545)

3.11.1 หลักการของการจัดทำบัญชีน้ำ Molden (1997) ได้เสนอการจัดการน้ำโดยใช้วิธีการจัดทำบัญชีน้ำซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาการใช้น้ำ การสูญหายและผลผลิตจากน้ำในหน่วยที่พิจารณา การจัดทำบัญชีน้ำมีหลักการพื้นฐานคล้ายกับการทำสมดุลของน้ำ (Water Balance) ซึ่งพิจารณาถึงปริมาณน้ำไหลเข้า (Inflow) ปริมาณไหลออก (Outflow) จากขอบเขตพื้นที่ที่พิจารณา (Domain) การจัดทำบัญชีน้ำสามารถวิเคราะห์ได้ 3 ระดับ ได้แก่ ระดับลุ่มน้ำ (Basin Level) ระดับโครงการชลประทาน (Irrigation Service Level) และระดับแปลงเพาะปลูก (Field Level) ซึ่งแสดงสมการสมดุลน้ำดังสมการที่ 6

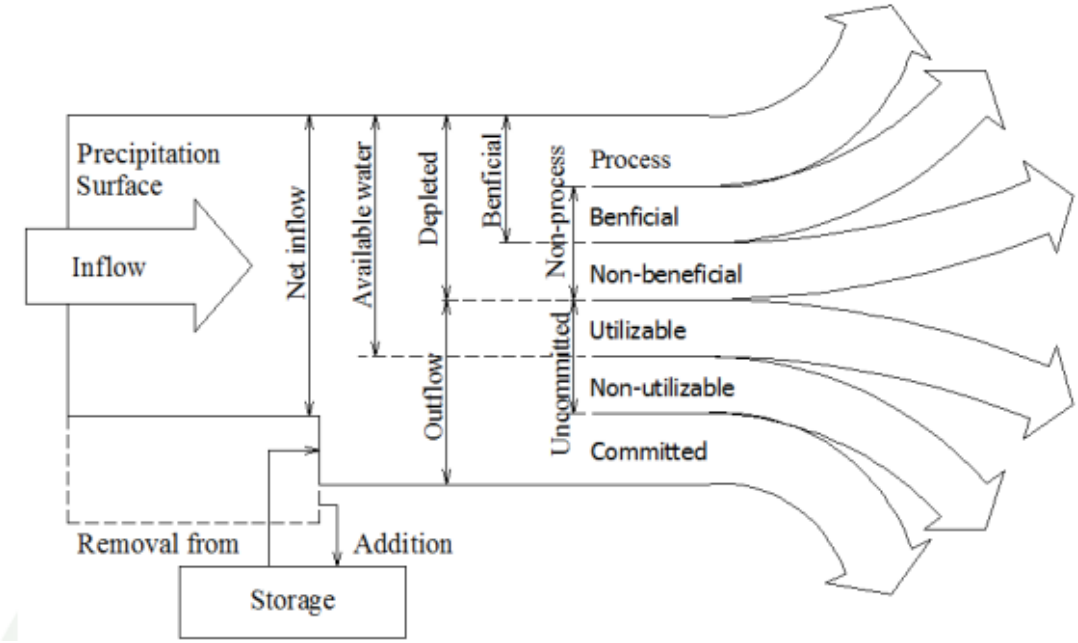
$$\Delta S = \Sigma I - \Sigma O \quad (6)$$

เมื่อ ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตร

ΣI คือ ผลรวมปริมาณน้ำไหลเข้า

ΣO คือ ผลรวมปริมาณน้ำไหลออก

การทำบัญชีน้ำต่างจากการทำสมดุลน้ำ ซึ่งการทำบัญชีน้ำจะพิจารณาปริมาณน้ำที่ไหลออก (Depletion และ Outflow) จากระบบโดยจำแนกตามกิจกรรมการใช้น้ำด้านต่าง ๆ ดังแสดงใน**รูปที่ 5**



รูปที่ 5 องค์ประกอบของบัญชีน้ำ
ที่มา : Molden, (1997)

3.11.2 คำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับบัญชีน้ำ ในการจัดทำบัญชีน้ำเป็นการแยกส่วนในกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งพิจารณาปริมาณน้ำในพื้นที่และจัดประเภทต่าง ๆ (เอกสิทธิ์และบัญชา, 2545) ดังต่อไปนี้

1) ปริมาณน้ำไหลเข้าทั้งหมด (Gross inflow, GI) เป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลเข้าในพื้นที่หรือบริเวณที่พิจารณา ประกอบด้วย น้ำฝน-น้ำท่าผิวดิน และน้ำท่าใต้ดิน

2) ปริมาณน้ำไหลเข้าสุทธิ (Net inflow, NI) เป็นปริมาณน้ำทั้งหมดรวมกับการเปลี่ยนแปลงของแหล่งกักเก็บในพื้นที่

3) ปริมาณน้ำที่สูญหายไป (Water depletion, WD) คือ น้ำที่ใช้หรือสูญหายไปโดยไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกซึ่งประกอบด้วย 4 กลุ่มคือ

ก) การระเหย (Evaporation) เป็นน้ำที่สูญหายไปโดยระเหยจากผิวดิน ผิวน้ำ และการคายน้ำจากพืช

ข) การไหลลงแอ่ง (Flow to Sink) เป็นน้ำที่ไหลลงพื้นที่ที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้หรือไม่คุ้มค่าที่จะนำกลับมาใช้อีก อาทิ พื้นที่ที่มีความเค็มสูง

ค) การปนเปื้อนมลพิษ (Pollution) เป็นน้ำที่คุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานที่จะนำมาใช้

ง) การรวมเข้าไปในผลิตผล (Incorporation into product) เป็นน้ำที่ถูกรวมเข้าไปในผลิตผลทั้งทางเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น น้ำที่บรรจุขวด หรือรวมเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของพืช

4) น้ำถูกใช้ไป (Process consumption, P) เป็นน้ำที่ถูกใช้ไปเพื่อเกิดผลผลิตตามความต้องการของมนุษย์

5) น้ำไม่ถูกใช้ (Non-process depletion, NP) เป็นน้ำที่หมดไปแต่ไม่ก่อให้เกิดผลผลิต ตามต้องการของมนุษย์ซึ่งน้ำส่วนนี้อาจสูญหายไปโดยมีประโยชน์ (Beneficial depletion) หรือไม่มีประโยชน์ (Non-beneficial depletion) ก็ได้

6) น้ำที่มีข้อผูกพัน (Committed water, C) เป็นส่วนหนึ่งของน้ำที่ไหลออกจากพื้นที่หรือบริเวณที่พิจารณาแต่น้ำส่วนนี้เป็นปริมาณที่กำหนดไว้ตามข้อตกลงต่าง ๆ เช่นเพื่อรักษาสมดุลนิเวศ หรือสิทธิผู้ใช้น้ำด้านท้ายน้ำ เป็นต้น

7) ปริมาณน้ำที่ไหลออกไปโดยไม่มีข้อผูกพัน (Uncommitted outflow, UC) เป็นน้ำที่ไหลออกจากพื้นที่หรือบริเวณที่พิจารณาโดยน้ำส่วนนี้เป็นส่วนที่เหลือจากการสูญหายและไม่มีข้อกำหนดผูกพัน ซึ่งสามารถแยกได้เป็นน้ำที่ยังนำมาใช้ได้ (Utilizable outflow, UO) และน้ำที่ไม่สามารถนำมาใช้ได้ (Non-utilizable outflow, NUO) โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการบริหารจัดการและเครื่องมือต่าง ๆ

8) ปริมาณน้ำที่นำมาใช้ได้ (Available water, AW) เป็นปริมาณน้ำไหลเข้าสุทธิหักปริมาณน้ำไหลออกที่มีข้อผูกพันและปริมาณน้ำที่ไหลออกโดยไม่มีข้อผูกพันที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ไม่ได้ หรือผลรวมของน้ำที่สูญหายไปทั้งที่ถูกใช้ไปและไม่ถูกใช้กับน้ำไหลออก ที่ยังนำมาใช้ได้ ดังสมการที่ 7

$$AW = NI - C - NOU \tag{7}$$

เมื่อ NI คือ ปริมาณน้ำไหลเข้าสุทธิ
C คือ น้ำที่มีข้อผูกพัน
NOU คือ น้ำที่ไม่มีข้อผูกพันที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ไม่ได้

หรือผลรวมของน้ำที่สูญหายไปทั้งที่ถูกใช้ไปและไม่ถูกใช้กับน้ำไหลออกที่ยัง นำมาใช้ได้ดังสมการที่ 8

$$AW = P + NP + UO \tag{8}$$

เมื่อ P คือ น้ำถูกใช้ไป
NP คือ น้ำไม่ถูกใช้
UO คือ น้ำที่ไม่มีข้อผูกพันที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้

3.12 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โอฬาร เวศอุไร (2548) ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำน่าน โดยใช้ข้อมูลการใช้ที่ดินในปี พ.ศ. 2520, 2537 และ 2544 เป็นตัวแทนในการเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่ป่าที่ลดลงตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลไปใช้ในแบบจำลอง SWAT พบว่าในช่วงฤดูฝนปริมาณน้ำท่าในปี พ.ศ. 2520 จะลดลงร้อยละ 11 เมื่อเทียบกับ พ.ศ. 2544 และในช่วงฤดูแล้งปี พ.ศ. 2520 จะมีปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2544 ร้อยละ 5 นอกจากนี้ได้กำหนดกรณีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินไปเป็นพื้นที่เกษตรและพื้นที่อยู่อาศัยเพิ่มขึ้นพบว่าปริมาณน้ำท่าในช่วงฤดูฝนจะเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำท่าในช่วงฤดูแล้งจะลดลงเมื่อเทียบกับ พ.ศ. 2544

สิริรักษ์ อินทรักษา (2555) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าบริเวณลุ่มน้ำแม่จาง จังหวัดลำปาง พบว่าแบบจำลองอุทกวิทยา SWAT สามารถจำลองน้ำท่าในสภาพที่น้ำมีลักษณะทางอุทกวิทยาตามธรรมชาติได้ในระดับดีกว่าลักษณะอุทกวิทยาที่มีการควบคุมจากสิ่งปลูกสร้าง ได้เปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2543 พบว่ามีผลรวมของปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีช่วงปี พ.ศ. 2544-2552 น้อยกว่ากรณีการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2552 ที่มีการขยายพื้นที่เกษตรกรรมเพิ่มขึ้น ส่วนพื้นที่ป่าไม้ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงและไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่มากนัก แต่อาจส่งผลทำให้เกิดปัญหาเรื่องการขาดแคลนน้ำและน้ำท่วมได้ในอนาคต

ปิยะวัฒน์ วุฒิชัยกิจเจริญ (2556) ได้ศึกษาปริมาณน้ำท่าและตะกอนลุ่มเชิงน้ำ โดยใช้แบบจำลอง SWAT ในลุ่มน้ำแม่แจ่ม มีวัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT ที่เหมาะสมสำหรับลุ่มน้ำแม่แจ่ม และทำการประเมินการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่า และตะกอนลุ่มน้ำภายใต้การเปลี่ยนสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน จากการปรับลดพื้นที่ป่าไม้เติมให้เป็นพื้นที่เกษตรกรรม ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลอง SWAT สามารถวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าและตะกอนได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ในช่วงการสอบเทียบแบบจำลอง และจากการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองสามารถวิเคราะห์ผลได้อยู่ในเกณฑ์พอใช้ ผลการวิจัยนี้เป็นเครื่องยืนยันว่าแบบจำลอง SWAT ให้ผลการวิเคราะห์เป็นที่น่าเชื่อถือ และสามารถใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ลุ่มน้ำภายได้การสภาวะเปลี่ยนแปลงรูปแบบต่าง ๆ เพื่อการจัดการลุ่มน้ำอย่างมีประสิทธิภาพในอนาคตต่อไป

สุจริต คูณธนกุลวงศ์ (2558) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกับการวางแผนบริหารจัดน้ำของไทย สรุปว่าการจัดทำบัญชีน้ำเป็นเครื่องมือบอกสถานะของปริมาณน้ำที่นำการจัดหาและการใช้มาเปรียบเทียบกัน ส่วนต่างก็จะเป็นปริมาณเกินหรือขาด ซึ่งก็จะไปเชื่อมโยงกับปริมาณน้ำเก็บกัก เนื่องจากน้ำมีการแปรผันตามพื้นที่และเวลา ช่วยในด้านของพื้นที่เพื่อดูการกระจายเป็นช่วงฤดูกาล เมื่อจัดทำแล้วก็จะดูเฉพาะค่าที่เปลี่ยนแปลง ก็จะทราบสถานณะของน้ำในพื้นที่และช่วงเวลาต่าง ๆ ได้

คณิดา ภูคงน้ำ (2561) ทำการศึกษาการประเมินน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำยม โดยใช้แบบจำลอง SWAT พบว่าการ ประเมินน้ำท่ารายเดือนและอัตราไหลรายเดือน บริเวณตำแหน่งสถานีอุทกวิทยา Y.20 Y.34 Y.38 และ Y.10 และเห็นได้ว่าปริมาณน้ำฝนที่ได้จากแบบจำลองจะผันแปรตามปริมาณฝน จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าช่วงเดือน กรกฎาคม ถึงเดือน กันยายน จะมีปริมาณฝนมากขึ้น ซึ่งในช่วงเดือนนี้จะเป็นช่วงฤดูฝน การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลองคำนวณการไหลของน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำยม ระหว่างปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าปริมาณน้ำท่าที่ตรวจวัดได้จริงจากสถานีอุทกวิทยารายเดือน พบว่าผลการสอบเทียบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง SWAT สามารถใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าเพื่อจัดการลุ่มน้ำอย่างมีประสิทธิภาพได้ต่อไป

3.13 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลฝนจากสถานีวัดฝน

ก่อนนำข้อมูลฝนมาใช้งานจำเป็นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลโดยวิธีโค้งทับทวี (Double Mass Curve) มาใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลฝน ซึ่งดำเนินการโดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนสะสมของสถานีที่ต้องการตรวจสอบกับค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนสะสมของกลุ่มสถานีที่อยู่ข้างเคียง ในกรณีที่ข้อมูลทั้งสองชุดมีความสอดคล้องกันจะได้กราฟความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นตรง และในกรณีที่ข้อมูลฝนของสถานีที่พิจารณามีความแตกต่างจากสถานีโดยรอบจะได้กราฟเบี่ยงเบนจากเส้นตรง ซึ่งในกรณีดังกล่าวจะพิจารณาตัดข้อมูลฝนรายเดือนของสถานีที่พิจารณาที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเบี่ยงเบนจากกราฟเส้นตรงจากมากไปหาน้อย จนทำให้กราฟความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นตรงที่ยอมรับ (กมลพัฒน์, 2562)

4. สรุปสาระสำคัญ ขั้นตอนการดำเนินการ และเป้าหมายของงาน

4.1 สาระสำคัญ

ในการบริหารจัดการน้ำ ข้อมูลน้ำท่าถือเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งในการใช้บริหารจัดการทรัพยากรน้ำในด้านต่าง ๆ ทั้งด้านเกษตรกรรม อุปโภคบริโภค การประมง การเดินเรืออุตสาหกรรม การวางแผนป้องกันและเฝ้าระวังน้ำท่วม และในปัจจุบันเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในหลาย ๆ พื้นที่ซึ่งกระทบต่อสภาพทางอุทกวิทยา เกิดพายุรุนแรง ฝนตกหนักและฝนทิ้งช่วงในบางพื้นที่ของประเทศไทย ทำให้เกิดปัญหาอุทกภัยและภัยแล้งอย่างต่อเนื่อง กรมชลประทานซึ่งเป็นหน่วยงานหลักทางด้านน้ำจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและวางแผนแนวทางการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากน้ำและสามารถใช้ประโยชน์จากทรัพยากรน้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ลุ่มน้ำห้วยหลวงเป็นแหล่งน้ำต้นทุนที่สำคัญของจังหวัดอุดรธานีและจังหวัดหนองคาย ซึ่งปัจจุบันมีแนวโน้มการขยายตัวทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ทำให้มีความต้องการใช้น้ำเพิ่มมากขึ้น นอกจากการใช้น้ำเพื่อการเกษตรแล้วยังมีการใช้น้ำเพื่ออุปโภคบริโภค และในบางพื้นที่ยังคงประสบปัญหาน้ำท่วมในช่วงฤดูฝน ได้แก่ บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและประเมินปริมาณน้ำท่า เพื่อหาแนวทางในการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำให้มีประสิทธิภาพและเพียงพอต่อความต้องการของคนในพื้นที่ โดยปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ข้อมูลอุทกวิทยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่ต่าง ๆ ที่มีความสลับซับซ้อนของข้อมูล รวมไปถึงความหลากหลายของพารามิเตอร์ในมิติต่าง ๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลปริมาณน้ำต้นทุนที่สามารถนำไปใช้ประกอบการวางแผนการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและเหมาะในแต่ละพื้นที่

ดังนั้น แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) จึงถูกนำมาใช้ประเมินปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวง โดยใช้ข้อมูลหลาย ๆ ด้านมาประกอบการวิเคราะห์ เช่น ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ข้อมูลอุทกวิทยา ข้อมูลประเภทดิน ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งจะทำให้ทราบถึงกระบวนการทางอุทกวิทยาที่เกิดขึ้นในลุ่มน้ำ และนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาจัดทำบัญชีน้ำ (Water Accounting) เพื่อให้เห็นถึงปริมาณน้ำที่สูญสียและปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่ นำไปเป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาและปรับปรุงการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ รวมไปถึงการวางแผนกำหนดกิจกรรมการใช้น้ำในด้านต่าง ๆ ภายในลุ่มน้ำ

4.2 วัตถุประสงค์

4.2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวงด้วยแบบจำลอง SWAT

4.2.2 เพื่อวิเคราะห์และจัดทำบัญชีน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวง

4.3 ขั้นตอนการดำเนินการ

4.3.1 กำหนดพื้นที่ศึกษา ทบทวนบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.3.2 รวมรวม ตรวจสอบ ปรับปรุงและวิเคราะห์ข้อมูลในลุ่มน้ำห้วยหลวงเพื่อใช้ในแบบจำลอง ได้แก่

1) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวัน ปี พ.ศ. 2554-2565
2) ข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวัน ปี พ.ศ. 2554-2565
3) ข้อมูลการระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงรายวัน ปี พ.ศ. 2554-2565
4) ข้อมูลแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (DEM) ความละเอียด 30 x 30 เมตร
5) ข้อมูลการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน (Land Use)
6) ข้อมูลประเภทของดิน (Soil Type)

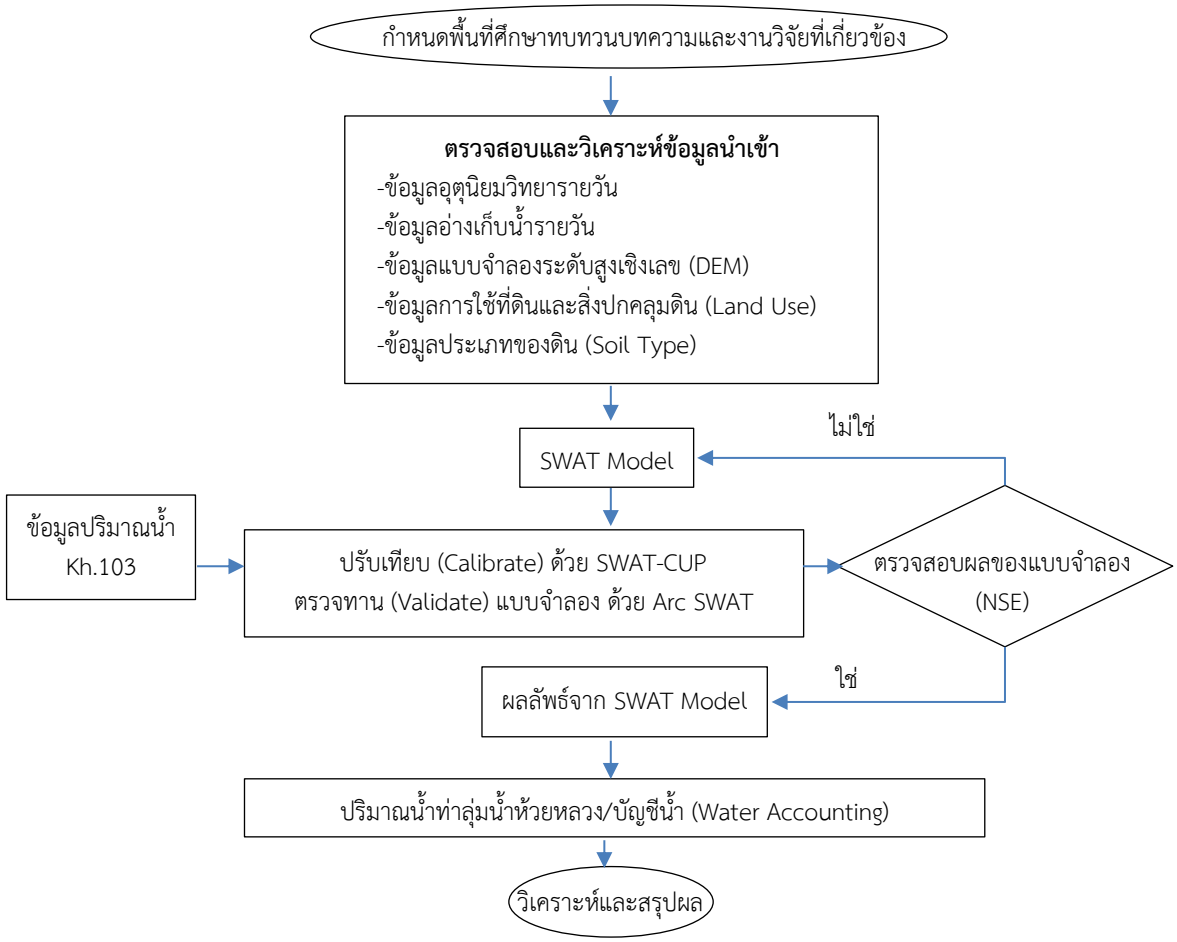
4.3.3 การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ประมวลผลข้อมูลด้วยแบบจำลอง SWAT (Arc SWAT)

4.3.4 ตรวจสอบผลลัพธ์จากแบบจำลองและทำการปรับเทียบแบบจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับลุ่มน้ำและทำการตรวจสอบแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม SWAT-CUP

4.3.5 นำผลที่ได้จากแบบจำลองหลังจากปรับค่าพารามิเตอร์มาวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยในลุ่มน้ำห้วยหลวงและวิเคราะห์แสดงผลข้อมูลในรูปของบัญชีน้ำ

4.3.6 วิเคราะห์และสรุปผล

รายละเอียดขั้นตอนดำเนินงานดังแสดงใน**รูปที่ 6**



รูปที่ 6 ผังการดำเนินงาน

4.4 เป้าหมายของงาน

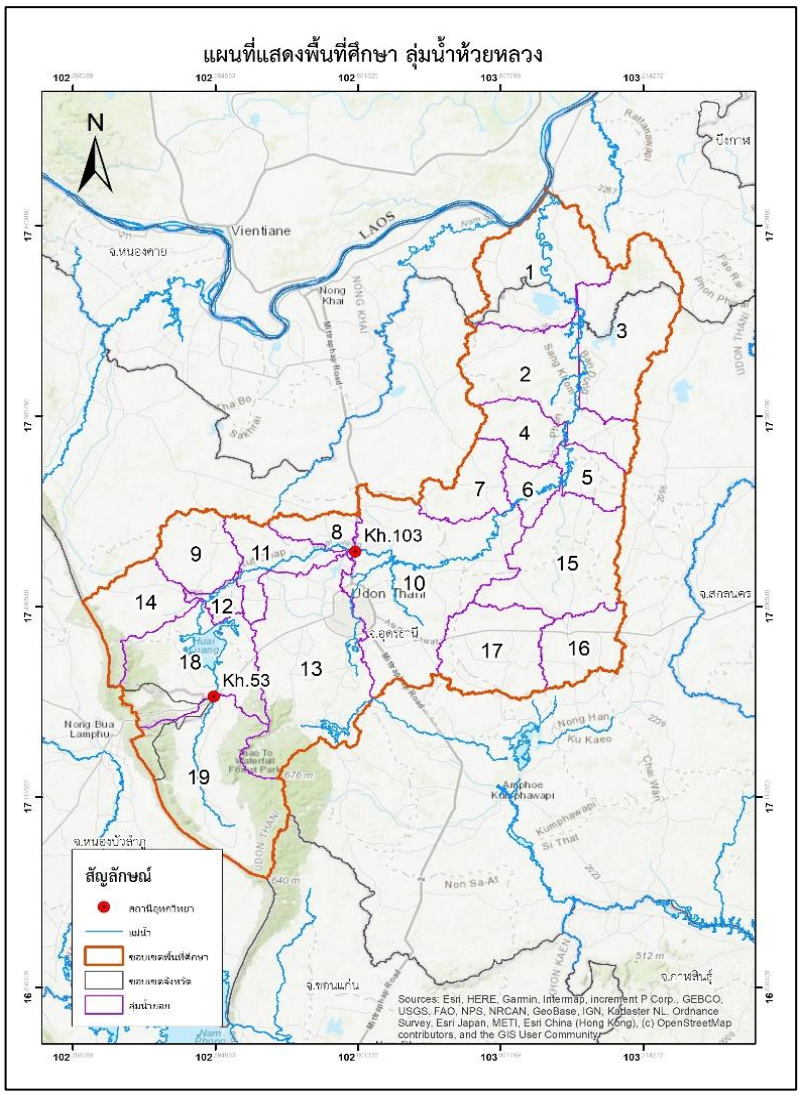
4.4.1 ศึกษาและวิเคราะห์หาปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวง เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาในงานทางอุทกวิทยา การพัฒนาแหล่งน้ำและการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำห้วยหลวง

4.4.2 ทราบปริมาณน้ำที่สูญเสียในกระบวนการต่าง ๆ วิเคราะห์ปริมาณน้ำต้นทุน เพื่อเป็นข้อมูลในการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับทรัพยากรน้ำในพื้นที่ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมต่อไป

4.5 ส่วนของงานที่ผู้ขอรับการประเมินเป็นผู้ปฏิบัติ

นายกฤษฎา นาแหลม ตำแหน่งนักอุทกวิทยาปฏิบัติการ ฝ่ายติดตามและวิเคราะห์สถานการณ์น้ำ ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนล่าง สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา ผู้ขอรับการประเมินทำหน้าที่รวบรวม ตรวจสอบข้อมูล นำเข้าข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลน้ำฝน-น้ำท่าประมวลผลข้อมูลโดยใช้แบบจำลอง SWAT สอบเทียบความถูกต้องของข้อมูลและนำผลจากแบบจำลองมาวิเคราะห์จัดทำบัญชีน้ำ สัดส่วนผลงานร้อยละ 80 ซึ่งมีรายละเอียดการดำเนินงานเพื่อให้งานบรรลุวัตถุประสงค์ ดังนี้

4.5.1 กำหนดพื้นที่ศึกษาบริเวณลุ่มน้ำห้วยหลวงซึ่งเป็นลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำโขงตะวันออกเฉียงเหนือ กำหนดจุดออก (Outlet) ของพื้นที่ศึกษาที่สบน้ำแม่น้ำห้วยหลวงบรรจบกับแม่น้ำโขง มีพื้นที่รับน้ำในลุ่มน้ำประมาณ 4,234 ตร.กม. ดังแสดงใน**รูปที่ 7**



รูปที่ 7 แผนที่แสดงพื้นที่ศึกษา

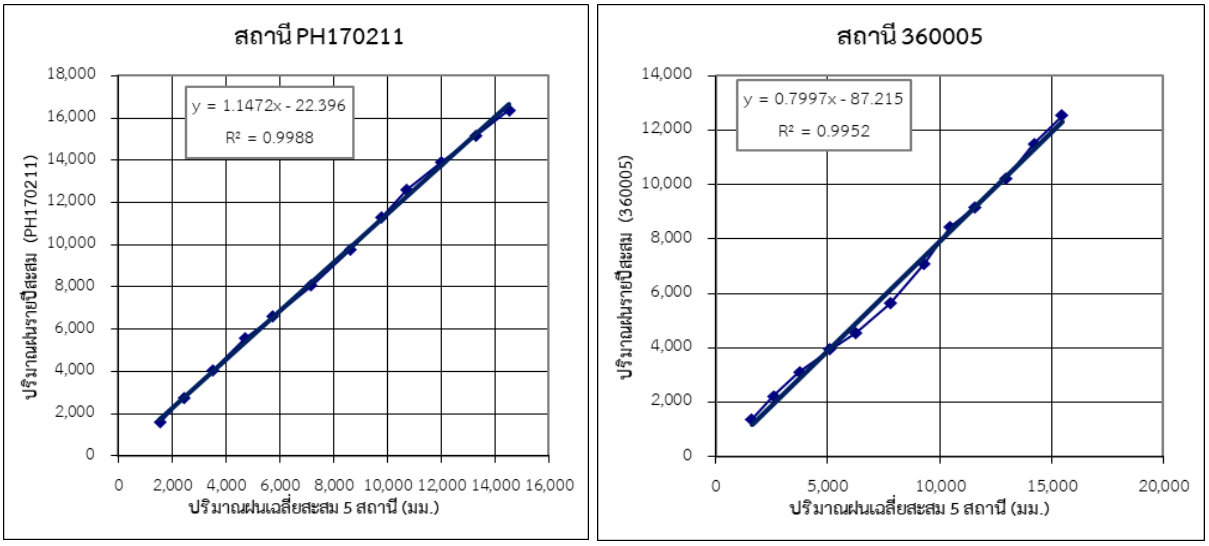
พื้นที่ศึกษาครอบคลุมจังหวัดหนองคาย จังหวัดอุดรธานีและจังหวัดหนองบัวลำภู ในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งลุ่มน้ำย่อย 19 ลุ่มน้ำ และมีอ่างเก็บน้ำที่สำคัญ ได้แก่ อ่างเก็บน้ำห้วยหลวง อยู่ในความรับผิดชอบของกรมชลประทาน มีความจุสูงสุด 135.56 ล้าน ลบ.ม. และพื้นที่ชลประทาน 83,000 ไร่ เปิดสำรวจปริมาณน้ำ 2 สถานี ได้แก่สถานีสำรวจทางอุทกวิทยา Kh.53 บ้านหนองวัวซอ อำเภอหนองวัวซอ จังหวัดอุดรธานี และสถานี Kh.103 บ้านเนินตูม อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี

4.5.2 รวบรวมและตรวจสอบข้อมูลปริมาณน้ำฝนในบริเวณพื้นที่ศึกษาโดยคัดเลือกสถานีตรวจวัดปริมาณน้ำฝนครอบคลุมลุ่มน้ำ ที่มีข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 – 2565 จำนวน 5 สถานี ได้แก่ สถานีบ้านนาสี สถานีอำเภอคูหาสวรรค์ สถานีอำเภอโนนสัง จังหวัดหนองบัวลำภู สถานีอำเภอหนองหาน สถานีอำเภอเมืองอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี สถานีอำเภอโพนพิสัย จังหวัดหนองคาย ดัง**รูปที่ 7** และ **ตารางที่ 1**

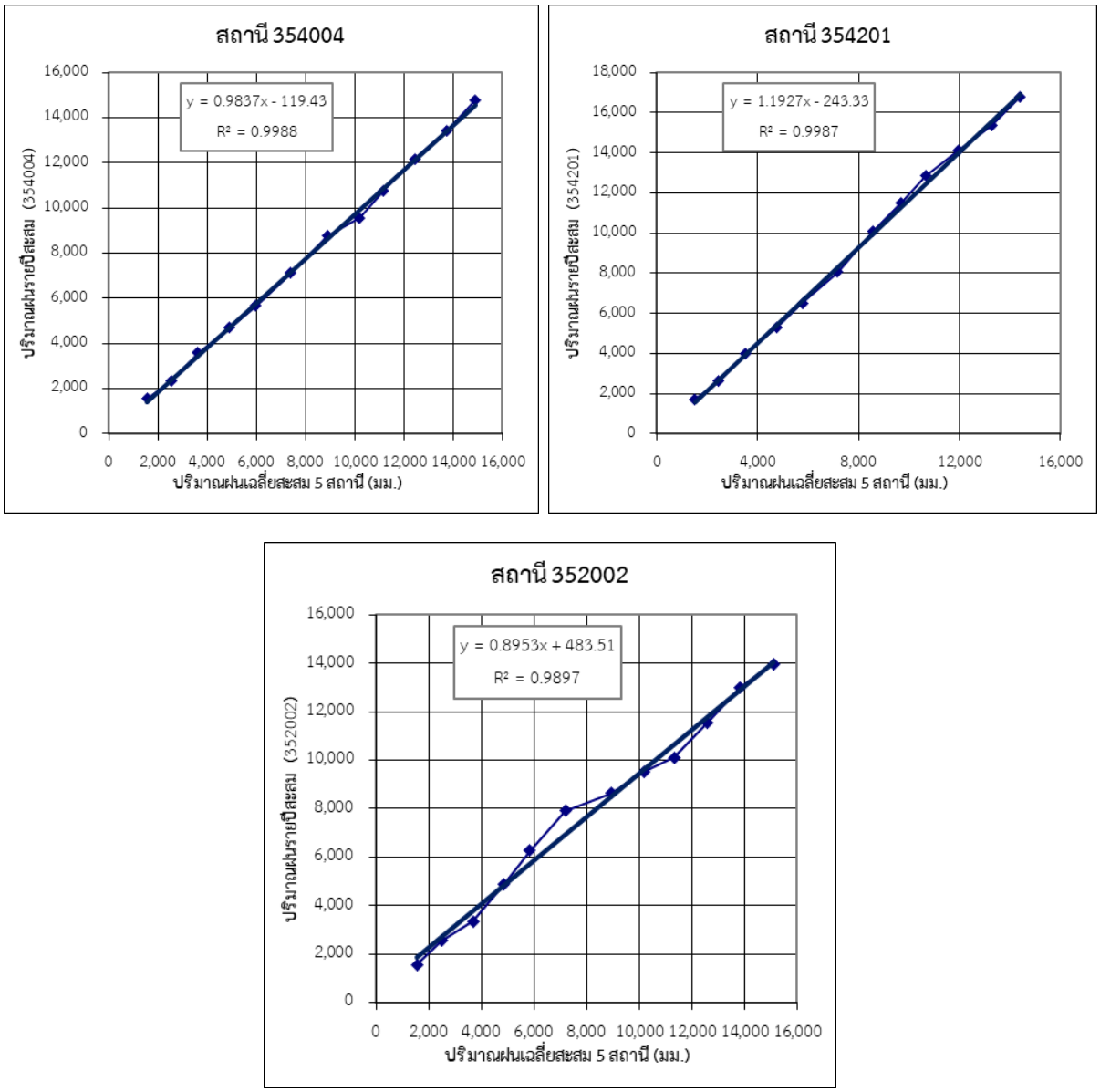
ตารางที่ 1 รายชื่อสถานีตรวจวัดปริมาณน้ำฝน

ลำดับ	ชื่อสถานี	อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด	หน่วยงาน
1	PH170211	คูหาสวรรค์	หนองบัวลำภู	17.5500	102.6500	คณะกรรมการแม่น้ำโขง
2	360005	โนนสัง	หนองบัวลำภู	16.8500	102.5670	กรมอุตุนิยมวิทยา
3	354004	หนองหาน	อุดรธานี	17.3670	103.1170	กรมอุตุนิยมวิทยา
4	354201	เมืองอุดรธานี	อุดรธานี	17.4330	102.7670	กรมอุตุนิยมวิทยา
5	352002	โพนพิสัย	หนองคาย	18.0170	103.0830	กรมอุตุนิยมวิทยา

ตรวจสอบข้อมูลปริมาณน้ำฝนโดยใช้วิธี Double-Mass Curve ในการตรวจสอบความคงตัวของสถิติข้อมูลน้ำฝน เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลตรวจวัดปริมาณน้ำฝน ก่อนนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนมาใช้งานในการประมวลผล โดยทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนสะสมของสถานีที่ต้องการตรวจสอบกับค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนสะสมของสถานีใกล้เคียง 5 สถานี และทำการตรวจสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบผลและดูความลาดชันของกราฟหากมีความลาดชันคงที่แสดงว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ในการประมวลผลได้ ตาม**รูปที่ 8-9**



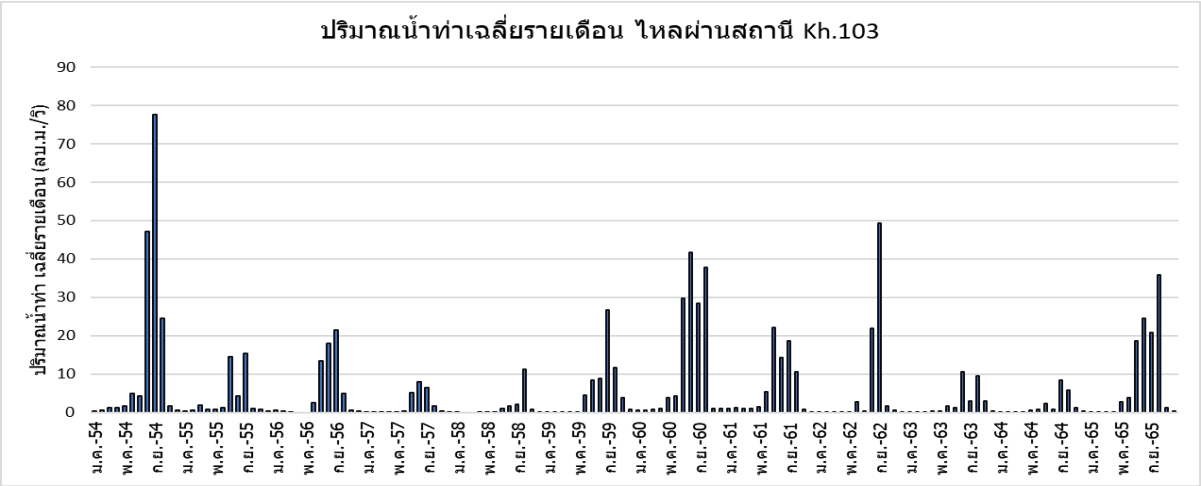
รูปที่ 8 กราฟ Double-Mass Curve สถานี PH170211 และสถานี 360005



รูปที่ 9 กราฟ Double-Mass Curve สถานี 534004 สถานี 534201 และสถานี 352005

4.5.3 รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำท่า

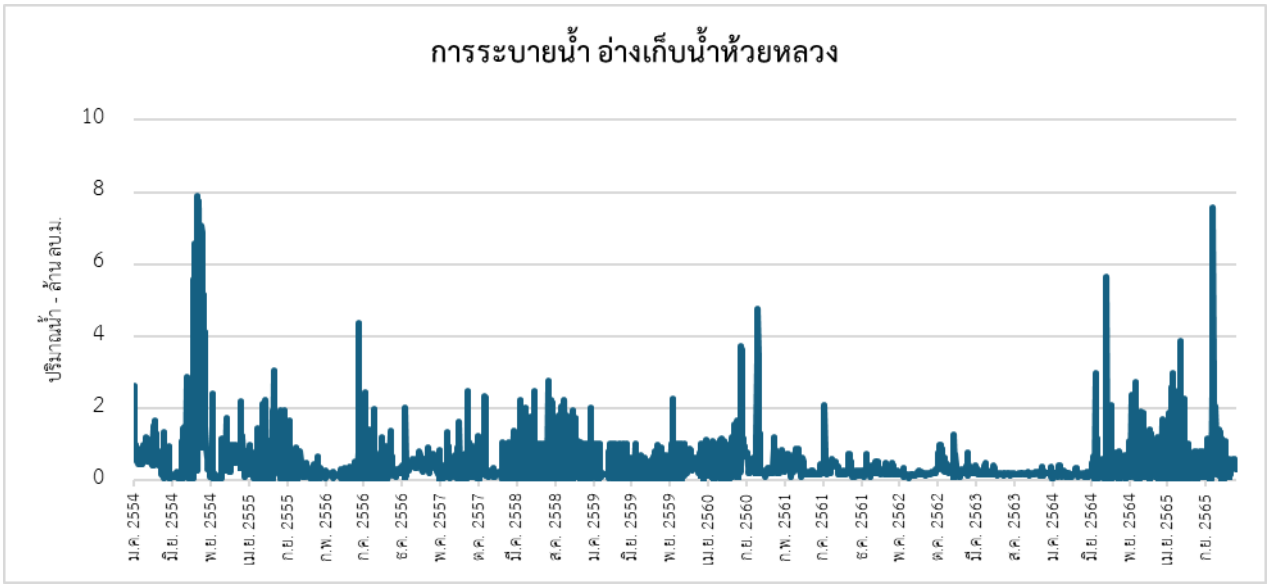
รวบรวมข้อมูลน้ำท่าจากสถานีอุทกวิทยาชลประทานในลุ่มน้ำห้วยหลวง สถานี Kh.103 บ้านเนินตูม อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี ปี พ.ศ. 2554-2565 เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและจัดทำข้อมูลน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือน เพื่อนำเข้าแบบจำลอง SWAT ดังแสดงใน**รูปที่ 10**



รูปที่ 10 กราฟน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือน สถานี Kh.103

4.5.4 รวบรวมการระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง

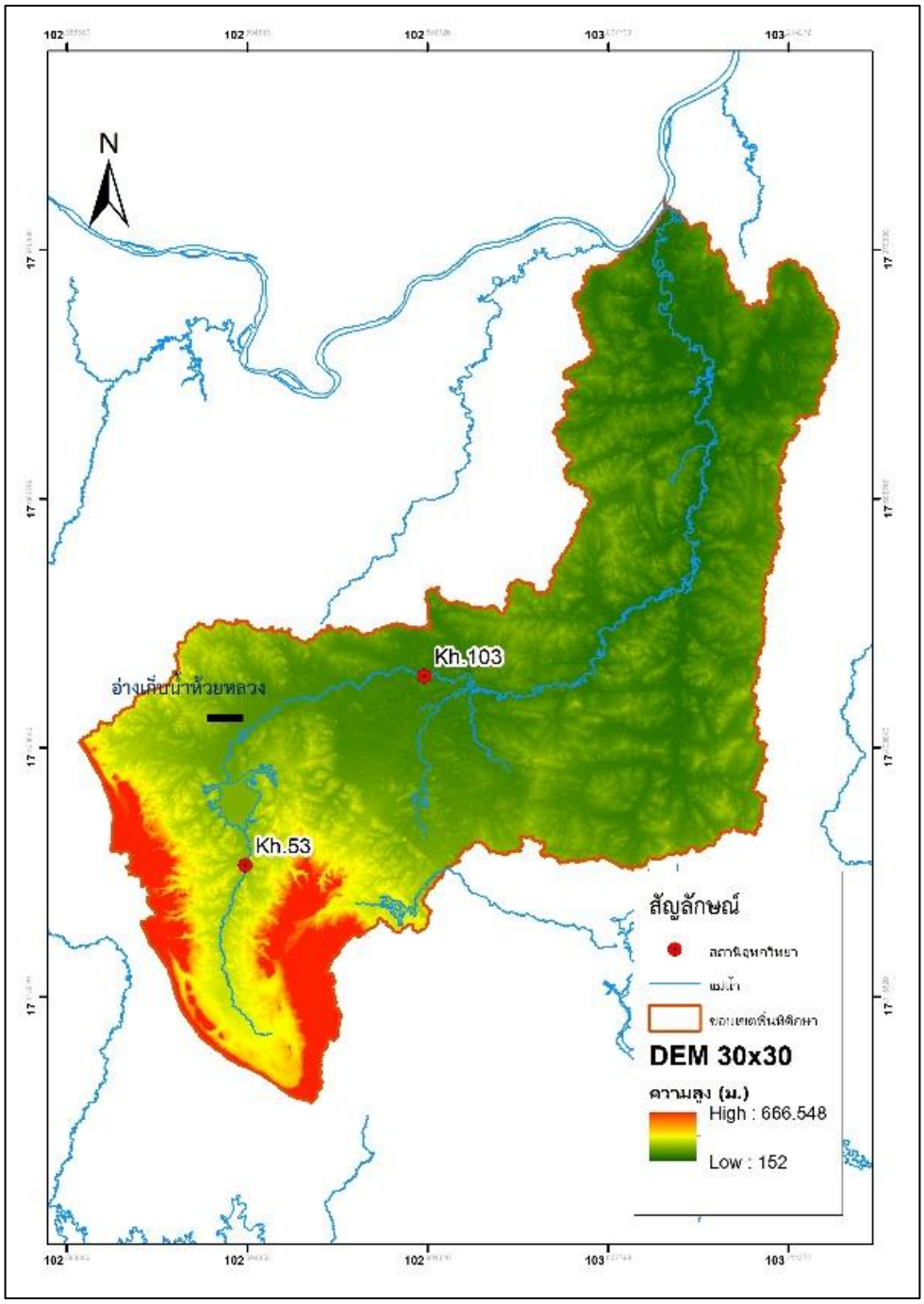
ในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวงมีอ่างเก็บน้ำที่สำคัญ คือ อ่างเก็บน้ำห้วยหลวง ซึ่งบริหารจัดการน้ำโดยกรมชลประทาน ทำหน้าที่เก็บกักน้ำเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตร อุปโภคบริโภค และใช้ในกิจกรรมอื่น ๆ และช่วยบรรเทาอุทกภัยใช้พื้นที่ด้านท้าย ทำการรวบรวมข้อมูลอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลการระบายน้ำรายวัน ในช่วงปี พ.ศ. 2554-2565 เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการจัดทำแบบจำลอง SWAT ดังแสดงใน**รูปที่ 11**



รูปที่ 11 กราฟการระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง

4.5.5 วิเคราะห์ประมวลผลข้อมูลแบบจำลองความสูง

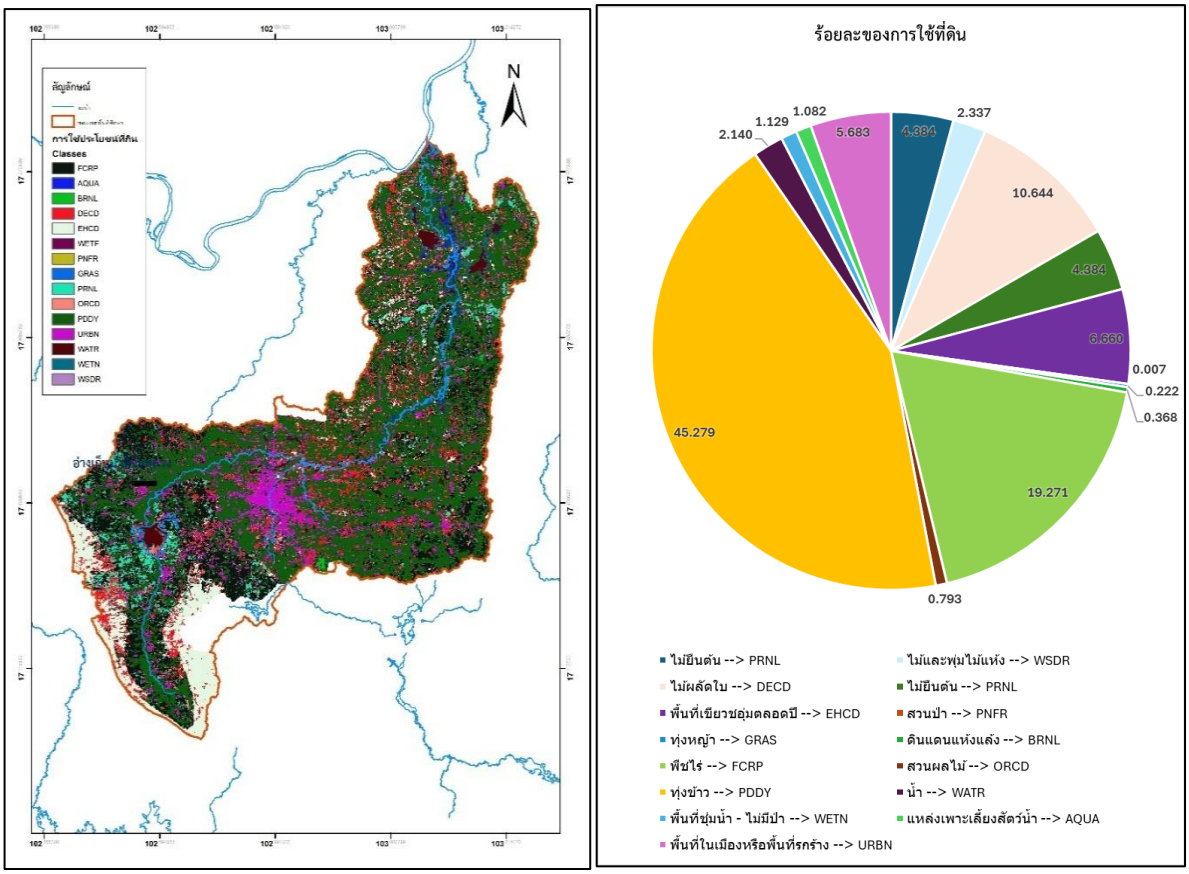
นำเข้าข้อมูลแบบจำลองความสูง (DEM) ในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวงจาก USGS วิเคราะห์และประมวลผลด้วยโปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ ปรับปรุงและปรับแก้ข้อมูลแบบจำลองความสูงให้มีความถูกต้อง จากข้อมูลแบบจำลองความสูงลุ่มน้ำห้วยหลวงมีพื้นที่สูงสุดที่บริเวณต้นน้ำ มีความสูงที่ 666 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง และมีพื้นที่ต่ำสุดบริเวณใกล้สบแม่น้ำโขงที่ระดับ 152 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ดังแสดงใน**รูปที่ 12**



รูปที่ 12 ข้อมูลแบบจำลองความสูง (DEM) พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวง

4.5.6 รวบรวมและวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดิน

กำหนดรหัสข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน พ.ศ. 2563 ของพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวง ให้สอดคล้องกับฐานข้อมูลประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินของ SWAT วิเคราะห์และจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้งหมด 15 กลุ่ม แบ่งเป็นกลุ่มพื้นที่ป่าไม้ 8 กลุ่ม คิดเป็นร้อยละ 29 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ กลุ่มพื้นที่เกษตร 3 กลุ่ม คิดเป็นร้อยละ 65 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ กลุ่มพื้นที่แหล่งน้ำคิดเป็นร้อยละ 4 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ และกลุ่มพื้นที่เมืองคิดเป็นร้อยละ 6 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ดังแสดงใน**ตารางที่ 2** และ**รูปที่ 13** พื้นที่ส่วนใหญ่ในลุ่มน้ำห้วยหลวงจะเป็นพื้นที่กลุ่มเกษตรกรรมซึ่งจะอยู่บริเวณตอนกลางและท้ายลุ่มน้ำ ส่วนพื้นที่กลุ่มป่าไม้ส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณต้นน้ำบริเวณเหนืออ่างเก็บน้ำห้วยหลวง



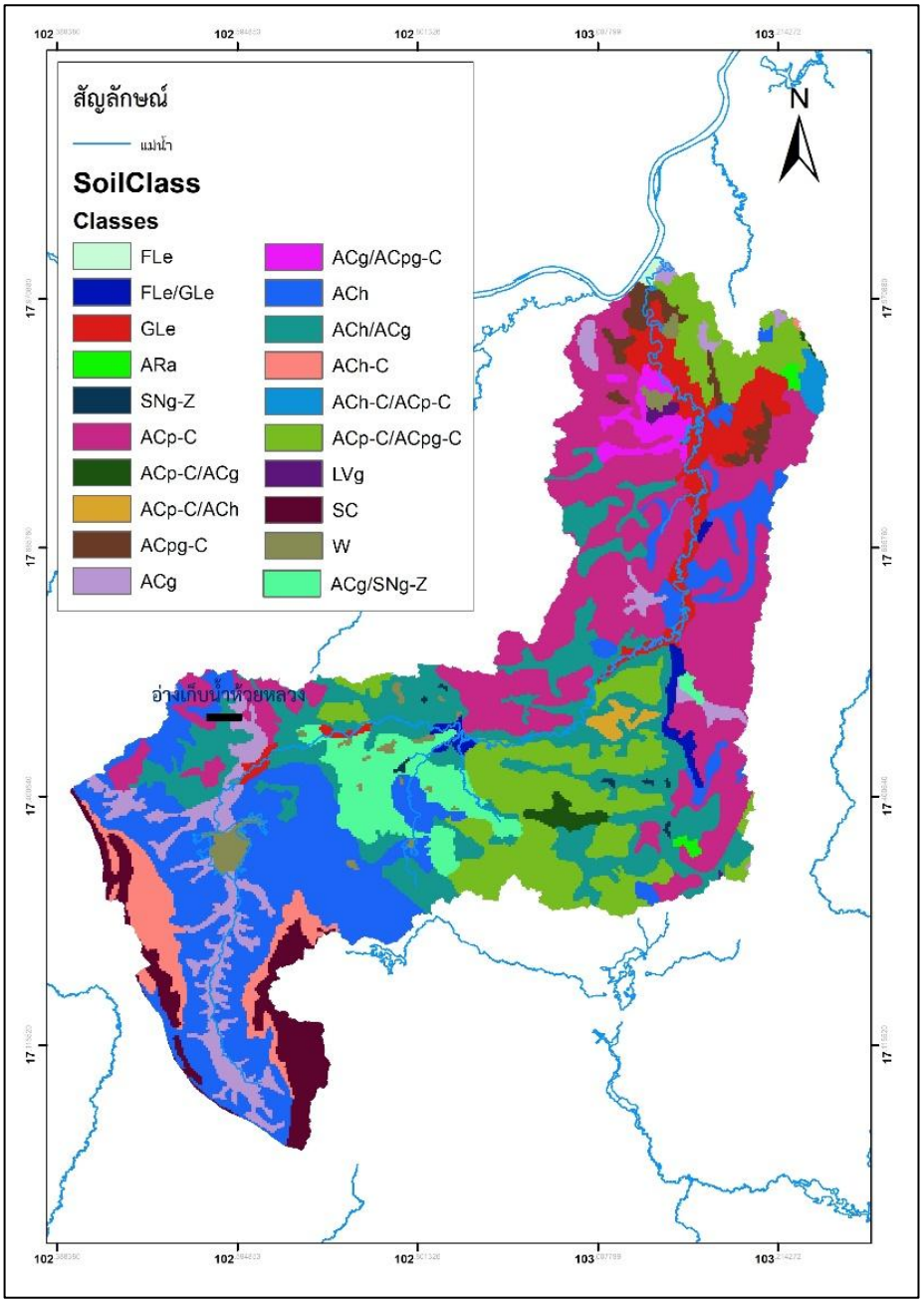
รูปที่ 13 การใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำห้วยหลวง

ตารางที่ 2 ประเภทการใช้ที่ดินในลุ่มน้ำห้วยหลวง

ประเภทการใช้ที่ดิน	พื้นที่ [ตร.กม.]	ร้อยละของการใช้ที่ดิน
ไม้ยืนต้น --> PRNL	185.63	4.384
ไม้และพุ่มไม้แห้ง --> WSDR	98.96	2.337
ไม้ผลัดใบ --> DECD	450.70	10.644
ไม้ยืนต้น --> PRNL	185.63	4.384
พื้นที่เขียวชอุ่มตลอดปี --> EHCD	281.99	6.660
สวนป่า --> PNFR	0.29	0.007
ทุ่งหญ้า --> GRAS	9.38	0.222
ดินแดนแห้งแล้ง --> BRNL	15.58	0.368
พืชไร่ --> FCRP	815.94	19.271
สวนผลไม้ --> ORCD	33.59	0.793
ทุ่งข้าว --> PDDY	1,917.18	45.279
น้ำ --> WATR	90.60	2.140
พื้นที่ชุ่มน้ำ - ไม่มีป่า --> WETN	47.82	1.129
แหล่งเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ --> AQUA	45.82	1.082
พื้นที่ในเมืองหรือพื้นที่รกร้าง --> URBN	240.64	5.683
รวม	**4,234.14**	**100.000**

4.5.7 รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลดิน

วิเคราะห์และจำแนกกลุ่มชุดดินในพื้นที่ศึกษาและเชื่อมโยงแผนที่ชนิดดิน โดยการ Reclassify ชนิดดินให้มีรหัสการใช้ที่ดินสอดคล้องกับฐานข้อมูล Arc SWAT จำแนกชนิดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวงได้ 20 ชนิด ดังแสดงใน**ตารางที่ 3** และ**รูปที่ 14** โดยมีกลุ่มดินที่มีชั้นดินเหนียว (Acrisol) พบมากที่สุดในลุ่มน้ำ คิดเป็นร้อยละ 88.57 ของลุ่มน้ำ กลุ่มดินที่มีชั้นดินหยาบกว่าดินร่วนปนทราย (Arenosol) คิดเป็นร้อยละ 0.27 กลุ่มดินตะกอนน้ำพา (Fluvisol) คิดเป็นร้อยละ 1.04 กลุ่มดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Gleysol) คิดเป็นร้อยละ 4.78 กลุ่มดินร่วนปนทรายไม่อิ่มตัว (Luvisol) คิดเป็นร้อยละ 0.16 กลุ่มดินในพื้นที่ลาดชันเชิงซ้อน (Slope Complex) คิดเป็นร้อยละ 3.74 กลุ่มดิน (Solonetz) คิดเป็นร้อยละ 0.15 กลุ่มที่เป็นน้ำ (Water) คิดเป็นร้อยละ 1.27



รูปที่ 14 ชนิดดินในลุ่มน้ำห้วยหลวง

ตารางที่ 3 ชนิดดินลุ่มน้ำห้วยหลวง

รหัสชุดดิน	ชื่อชุดดิน	กลุ่มชุดดิน	พื้นที่ (ตร.กม.)	ร้อยละ
ACg	Gleyic Acrisol	Acrisol	236.53	5.59
Acg/Acpg-C	Gleyic Acrisol/Gleyi-plinthic Acrisol-skeletic	Acrisol	55.25	1.31
Acg/SNg-Z	Gleyic Acrisol/Gleyic Solonetz-salic	Acrisol	194.60	4.60
Ach	Haplic Acrisol	Acrisol	835.37	19.73
Ach/Acg	Haplic Acrisol/Gleyic Acrisol	Acrisol	689.17	16.28
Ach-C	Haplic Acrisol-skeletic	Acrisol	137.58	3.25
Ach-C/Acp-C	Haplic Acrisol-skeletic/Plinthic Acrisol-skeletic	Acrisol	19.95	0.47
Acp-C	Plinthic Acrisol-skeletic	Acrisol	961.74	22.71
Acp-C/Acg	Plinthic Acrisol-skeletic/Gleyic Acrisol	Acrisol	24.80	0.59
Acp-C/Ach	Plinthic Acrisol-skeletic/Haplic Acrisol	Acrisol	19.81	0.47
Acp-C/Acpg-C	Plinthic Acrisol-skeletic/Gleyi-plinthic Acrisol-skeletic	Acrisol	518.62	12.25
Acpg-C	Gleyi-plinthic Acrisol-skeletic	Acrisol	56.90	1.34
Ara	Albic Arenosol	Arenosol	11.36	0.27
Fle	Eutric Fluvisol	Fluvisol	5.10	0.12
Fle/Gle	Eutric Fluvisol/Eutric Gleysol	Fluvisol	39.17	0.93
Gle	Eutric Gleysol	Gleysol	202.61	4.79
LVg	Gleyic Luvisol	Luvisol	6.49	0.15
SC	Slope complex	Slope Complex	158.41	3.74
SNg-Z	Gleyic Solonetz-salic	Solonetz	6.68	0.16
W	Water	Water	54.00	1.28
รวม			**4,234**	**100**

4.5.8 กำหนดระดับความลาดชัน

วิเคราะห์ข้อมูลความลาดชันทำให้เข้าใจถึงลักษณะภูมิประเทศสูงต่ำ ซึ่งส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าที่เกิดจากฝนและทิศทางการไหล ในส่วนของการตั้งค่าความลาดชัดในพื้นที่จะทำการแบ่งความลาดชันตามเกณฑ์ที่ก่อให้เกิดการชะล้างพังทลายของดินของกรมพัฒนาที่ดิน ซึ่งจะส่งผลต่อการไหลของน้ำและการพัดพาตะกอนในลุ่มน้ำ แบ่งออกเป็น 5 ช่วงข้อมูล **ดังตารางที่ 4** พบว่าร้อยละ 72.38 ของลุ่มน้ำเป็นพื้นที่ราบถึงลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อยมีเปอร์เซ็นต์ความลาดชันที่ 0-5 ส่วนใหญ่จะพบในตอนกลางและตอนล่างของลุ่มน้ำ ส่วนพื้นที่ที่เป็นเนินเขาและพื้นที่ความลาดชันสูงจะพบมากในบริเวณต้นน้ำของลุ่มน้ำ

ตารางที่ 4 ชั้นข้อมูลความลาดชันในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวง

% ความลาดชัน	คำอธิบาย	พื้นที่ [ตร.กม.]	ร้อยละ
0-5	พื้นที่ราบถึงลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อย	3,064.69	72.38
5-12	พื้นที่ลูกคลื่นลอนลาด	882.32	20.84
12-20	พื้นที่ลูกคลื่นลอนชัน	192.45	4.55
20-35	พื้นที่เนินเขา	75.16	1.78
>35	พื้นที่ความลาดชันสูง	19.49	0.46
รวม		**4,234.14**	**100.00**

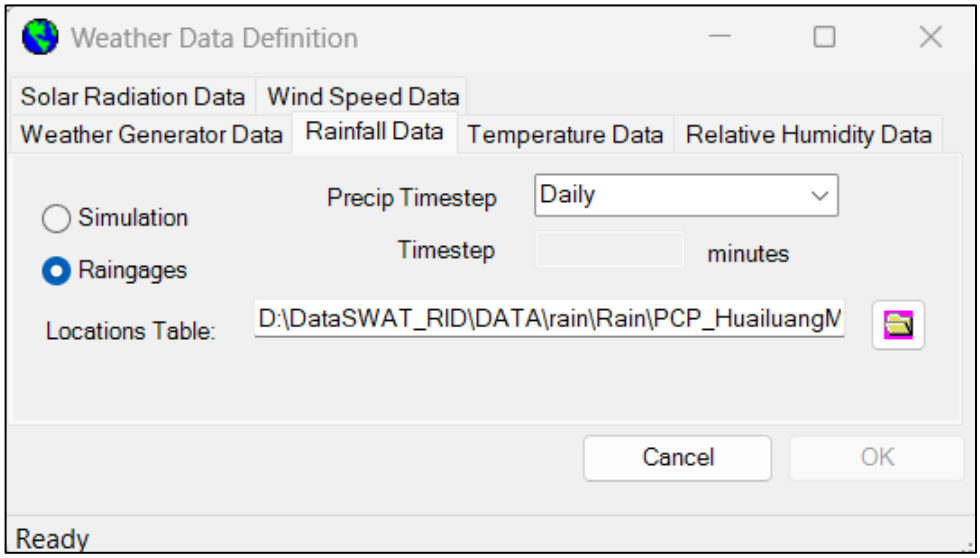
4.5.9 ประเมินน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT

ในการศึกษาการประเมินน้ำท่าของแบบจำลอง SWAT ในลุ่มน้ำห้วยหลวงโดยโปรแกรม Arc SWAT มีกระบวนการนำเข้าข้อมูลอยู่สองรูปแบบ คือ การนำเข้าข้อมูลภูมิศาสตร์เชิงพื้นที่แบบ grid และการนำเข้าข้อมูลในรูปแบบตารางข้อมูล โดยมีขั้นตอนหลัก ดังนี้

1) ทำการกำหนดพื้นที่ลุ่มน้ำ (Watershed Delineation) เป็นการจำลองสภาพทางกายภาพโดยทั่วไปของพื้นที่ลุ่มจากแบบจำลอง ซึ่งนำข้อมูลแบบจำลองความสูง (DEM) และทำการคำนวณทิศทางการไหล(Flow Direction) การไหลสะสม (Flow Accumulation) ของน้ำในแต่ละกริด หลังจากนั้นกำหนดรายละเอียดของโครงข่ายเส้นทางน้ำ กำหนดจุด Outlet ที่ตำแหน่งของอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง ตำแหน่งที่ตั้งสถานีตรวจวัดอุทกวิทยาสถานี Kh.103 และกำหนดให้จุดบรรจบระหว่างแม่น้ำห้วยหลวงกับแม่น้ำโขง เป็นจุดออก Outlet ของพื้นที่ศึกษา หลังจากประมวลผลออกมาแล้วได้พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยทั้งหมด 19 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงใน**รูปที่ 7**

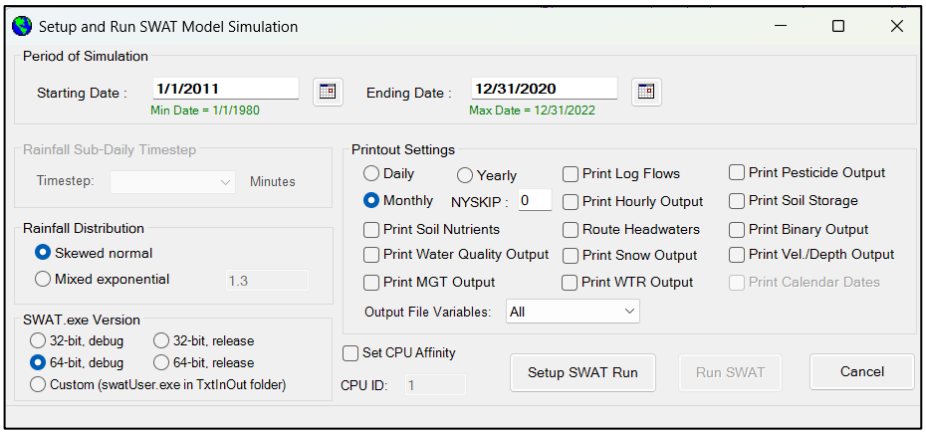
2) ทำการวิเคราะห์หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRU Analysis) โดยกำหนดเงื่อนไขของการสร้างหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยาของแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย แบบ Multiple Hydrologic Response Units เป็นการกำหนดให้แต่ละลุ่มน้ำย่อยมี HRUs สอดคล้องตามเปอร์เซ็นต์ของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดดิน และความลาดชัน หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยาที่ได้จะสามารถอธิบายว่าพื้นที่ที่มีการตอบสนองทางอุทกวิทยาในแบบต่าง ๆ จะเกิดน้ำท่าไหลปริมาณเท่าไรและไหลไปทางทิศทางใดบ้าง

3) กำหนดสภาพภูมิอากาศและสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง SWAT โดยนำเข้าข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ทำการวิเคราะห์ไว้แล้ว ข้อมูลอุณหภูมิและข้อมูลสภาพภูมิอากาศอื่น ๆ (ข้อมูลจากฐานข้อมูล Arc SWAT) นำเข้าข้อมูลการระบายน้ำและทำการสร้างไฟล์ฐานข้อมูลตารางเพื่อนำเข้าแบบจำลอง SWAT ดังแสดงใน**รูปที่ 15**



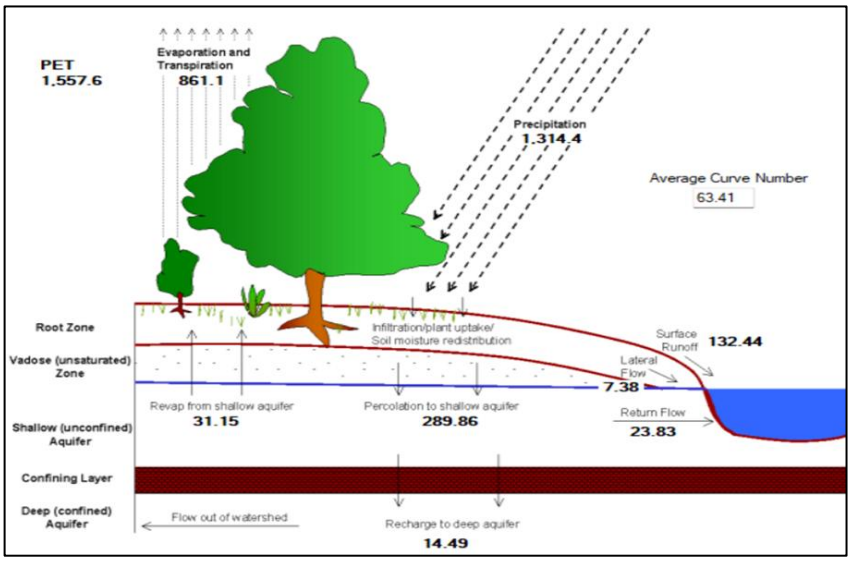
รูปที่ 15 การนำเข้าข้อมูลสภาวะอากาศในแบบจำลอง SWAT

4) ประมวลผลแบบจำลอง SWAT (SWAT Simulation) ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกประมวลผลข้อมูลเป็นรายเดือนเริ่มต้น เดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 เพื่อให้ผลการศึกษาได้ผลลัพธ์ที่ครอบคลุมเหตุการณ์ปีที่มีปริมาณน้ำน้อยและปริมาณน้ำมาก ดังแสดงใน**รูปที่ 16**



รูปที่ 16 การกำหนดช่วงเวลาประมวลผลแบบจำลอง SWAT

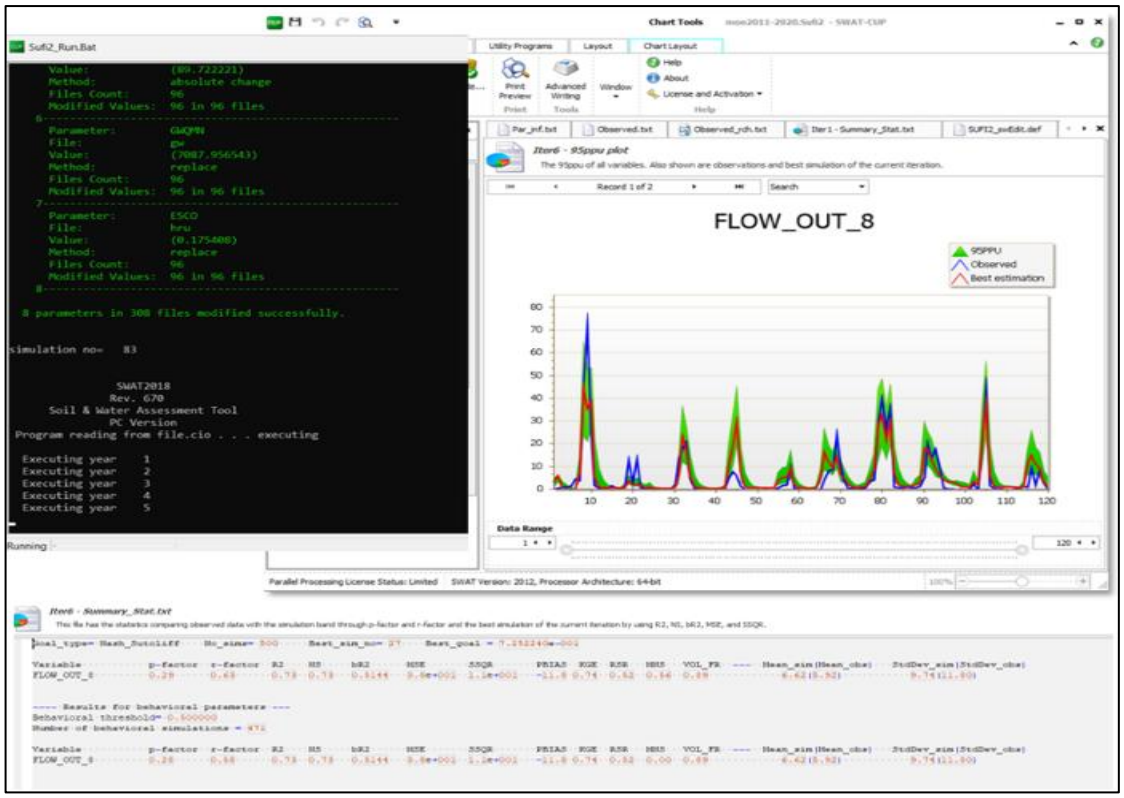
หลังจากประมวลผลเรียบร้อยแล้ว ทำการแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวง เพื่อตรวจเช็คผลของการวิเคราะห์โดยรวมผ่าน SWAT Check ซึ่งจะทำให้เห็นถึงกระบวนการทางอุทกวิทยาที่เกิดขึ้นในลุ่มน้ำเมื่อเกิดฝนตกในพื้นที่ การคายระเหยและการซึมลงในชั้นดิน การไหลบ่าและเกิดเป็นน้ำท่าในลุ่มน้ำ ดังแสดงใน**รูปที่ 17** ซึ่งค่าที่ได้จำเป็นต้องมีการปรับเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงก่อน



รูปที่ 17 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าก่อนปรับแก้พารามิเตอร์

4.5.10 การปรับเทียบแบบจำลอง (Calibration) และการตรวจสอบแบบจำลอง (Validation)

การปรับเทียบแบบจำลองโดยใช้ปริมาณน้ำท่ารายเดือนกับข้อมูลสำรวจทางอุทกวิทยาสถานี Kh.103 ปี พ.ศ. 2554-2563 ด้วยโปรแกรม SWAT-CUP โดยวิธี SUF-II ซึ่งจะวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ก่อนทำการปรับเทียบจำเป็นต้องศึกษาค่าตัวแปรต่าง ๆ จากงานวิจัยและบทความที่เคยทำการศึกษาในพื้นที่ประเทศไทยและในพื้นที่บริเวณลุ่มน้ำที่มีลักษณะทางอุทกวิทยาใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษา เพื่อลดระยะเวลาในการปรับเทียบแบบจำลองและเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสม หลังปรับเทียบแบบจำลองพบว่า การจำลองปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนในช่วงปี พ.ศ. 2564-2565 ที่นำมาพิจารณาค่าความถูกต้องทางสถิติมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด โดยรายละเอียดของค่าตัวแปรที่มีความเหมาะสมหลังการปรับเทียบแล้ว ดัง**ตารางที่ 5** และ**รูปที่ 18**



รูปที่ 18 การปรับเทียบแบบจำลองด้วยโปรแกรม SWAT-CUP

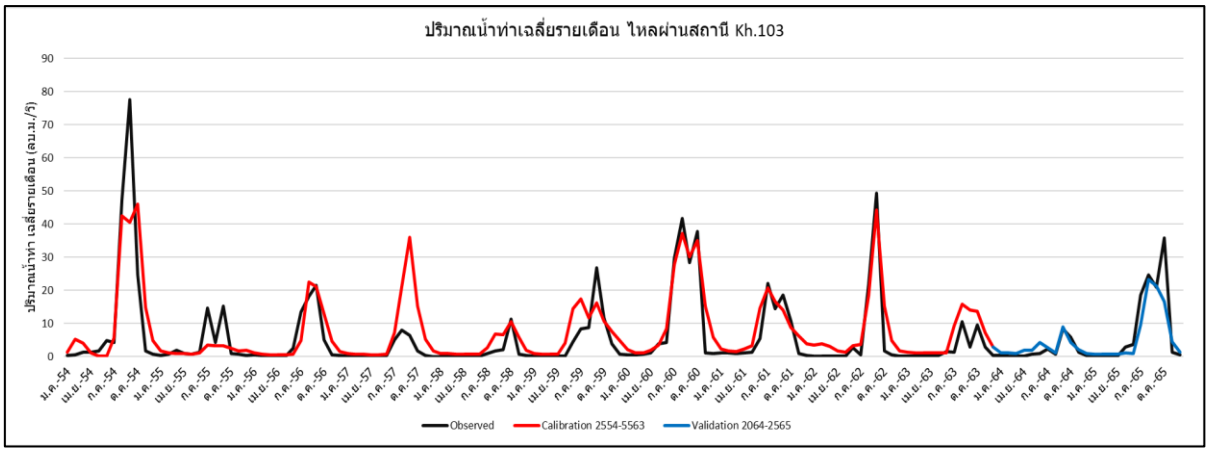
ตารางที่ 5 ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดจากการปรับเทียบแบบจำลอง (Calibration) SWAT-CUP

Parameter	Definition	Value
CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium. (mm/hr)	434.666107
CH_N2.rte	Manning's "n" value for the main channel	-0.047476
CN2.mgt	SCS runoff curve number	-0.042924
ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor	0.069059
ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor (days)	0.089162
GW_DELAY.gw	Groundwater delay (days)	288.789368
GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	4967.167969
SURLAG.bsn	Surface runoff lag coefficient (days)	19.82551

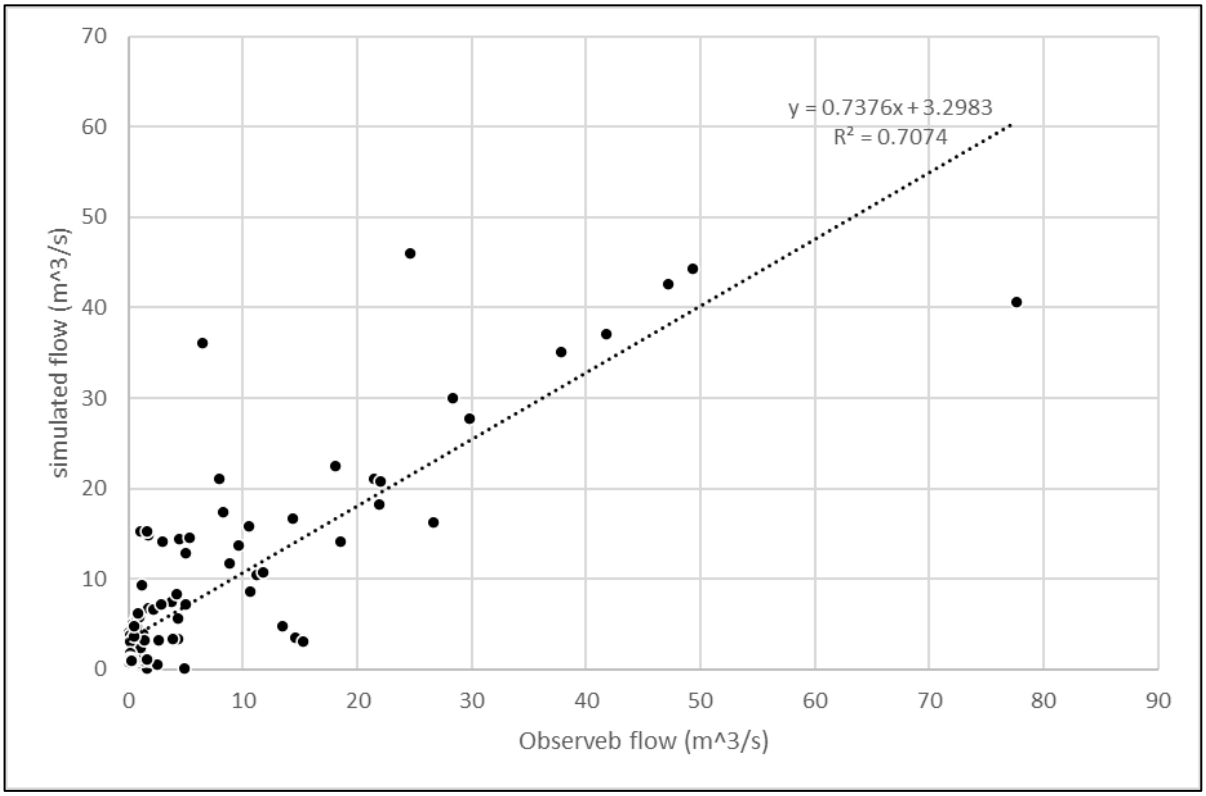
การตรวจสอบแบบจำลอง (Validation) หลังจากปรับเทียบแบบจำลองและได้พารามิเตอร์ความอ่อนไหวน้อยที่สุด จำนวน 8 พารามิเตอร์ ได้ค่าที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดและประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ดัชนีทางสถิติตรวจสอบความแม่นยำของผลลัพธ์ NSE และ R^2 ซึ่งได้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่ดี แล้วนำเข้ากลุ่มค่าพารามิเตอร์ชุดดังกล่าวลงในแบบจำลอง SWAT เพื่อตรวจสอบจำลอง (Validation) ปริมาณน้ำท่าในปี พ.ศ. 2564-2565 ด้วยโปรแกรม Arc SWAT อีกครั้ง

ตารางที่ 6 ผลการปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง SWAT กับข้อมูลน้ำท่าสถานี Kh.103

สถานี Kh.103	NSE	R^2
ปรับเทียบข้อมูล (2554-2563)	0.73	0.73
ตรวจสอบ (2564-2565)	0.77	0.82
ทั้งหมด (2554-2565)	0.69	0.71

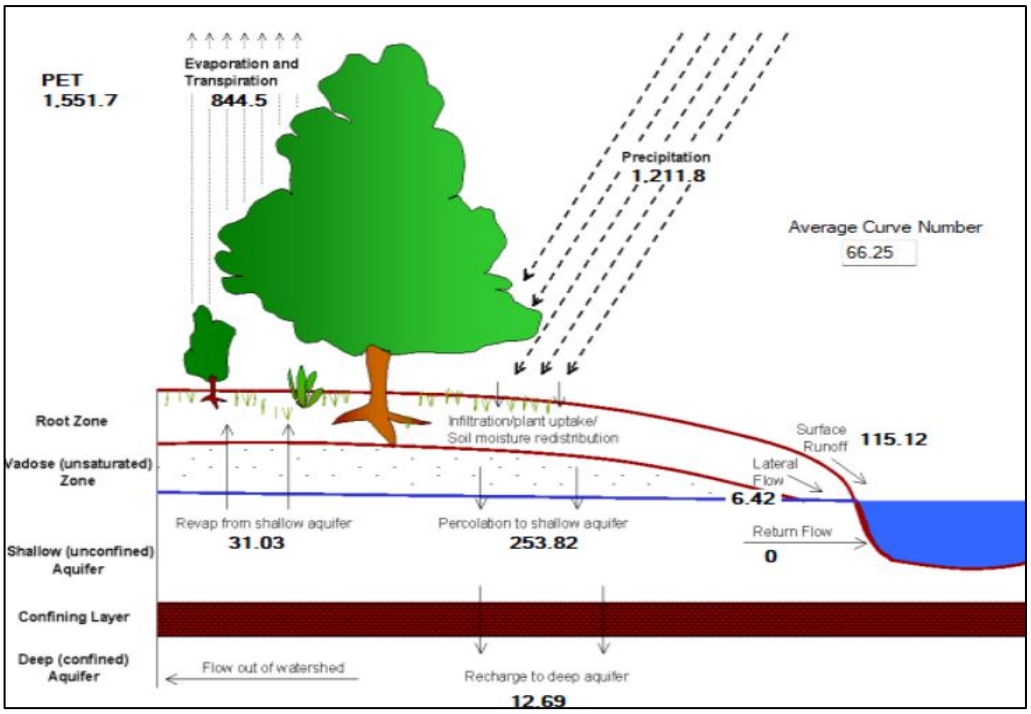


รูปที่ 19 ผลการปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง SWAT กับข้อมูลน้ำท่าสถานี Kh.103

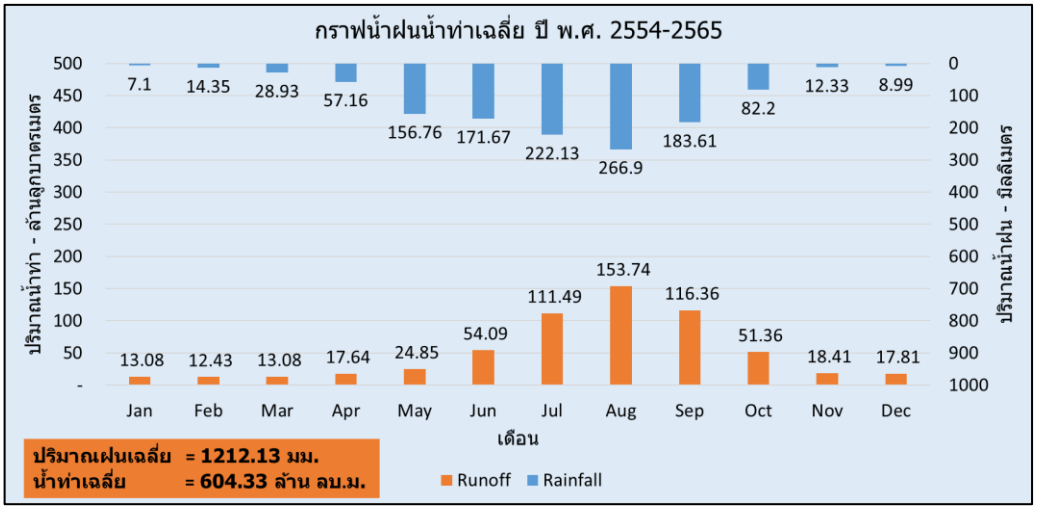


รูปที่ 20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการจำลองและค่าของการตรวจวัด ช่วงปี พ.ศ. 2554-2565

ผลการศึกษาปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง SWAT ดังแสดงใน**รูปที่ 19** เมื่อทำการปรับเทียบแบบจำลองด้วยโปรแกรม SWAT-CUP ปี พ.ศ. 2554-2563 ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.73 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ค่า NSE เท่ากับ 0.73 อยู่ในเกณฑ์ดี และเมื่อทำการตรวจสอบแบบจำลอง ปี พ.ศ. 2564-2565 ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.77 และค่า NSE เท่ากับ 0.83 อยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งคู่ และผลจากการจำลอง SWAT ปี พ.ศ. 2554-2565 ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.69 และค่า NSE เท่ากับ 0.71 อยู่ในเกณฑ์ดีทั้งคู่ดังแสดงใน**ตารางที่ 6** และ**รูปที่ 20** ดังนั้น จากการใช้ดัชนีทางสถิติสำหรับประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง ให้ผลของการจำลองปริมาณน้ำท่ามีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 21 การแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าหลังปรับแก้พารามิเตอร์



รูปที่ 22 กราฟน้ำฝน-น้ำท่าเฉลี่ย ปี พ.ศ. 2554-2565

ผลการจำลองปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวง ปี พ.ศ. 2554-2565 ด้วยแบบจำลอง SWAT พบว่าลุ่มน้ำห้วยหลวงมีปริมาณฝนเฉลี่ย 12 ปี เท่ากับ 1,212 มิลลิเมตร โดยจะมีฝนตกมากในช่วงเดือนกรกฎาคม-เดือนกันยายน มีฝนตกเฉลี่ยสูงสุดในเดือนสิงหาคม 266.9 มิลลิเมตร สามารถประเมินปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำเฉลี่ย 12 ปี เท่ากับ 604.33 ล้านลูกบาศก์เมตร มีปริมาณน้ำท่ามากในช่วงเดือนกรกฎาคม-เดือนกันยายน มีปริมาณน้ำท่าสูงสุดในเดือนสิงหาคมเท่ากับ 153.74 ล้านลูกบาศก์เมตร ดังแสดงใน**รูปที่ 21-22**

เปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองกับค่าตรวจวัดจริง โดยใช้ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยปี พ.ศ. 2554-2565 ของสถานี Kh.103 เทียบกับอัตราส่วนพื้นที่รับน้ำของสถานี Kh.103 เพื่อประมาณค่าปริมาณน้ำทั้งลุ่มน้ำ สถานี Kh.103 มีปริมาณน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 189 ล้านลูกบาศก์เมตร มีพื้นที่รับน้ำร้อยละ 40 ของลุ่มน้ำ ประมาณค่าปริมาณน้ำท่าทั้งลุ่มน้ำได้เท่ากับ 662 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการจำลองปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง

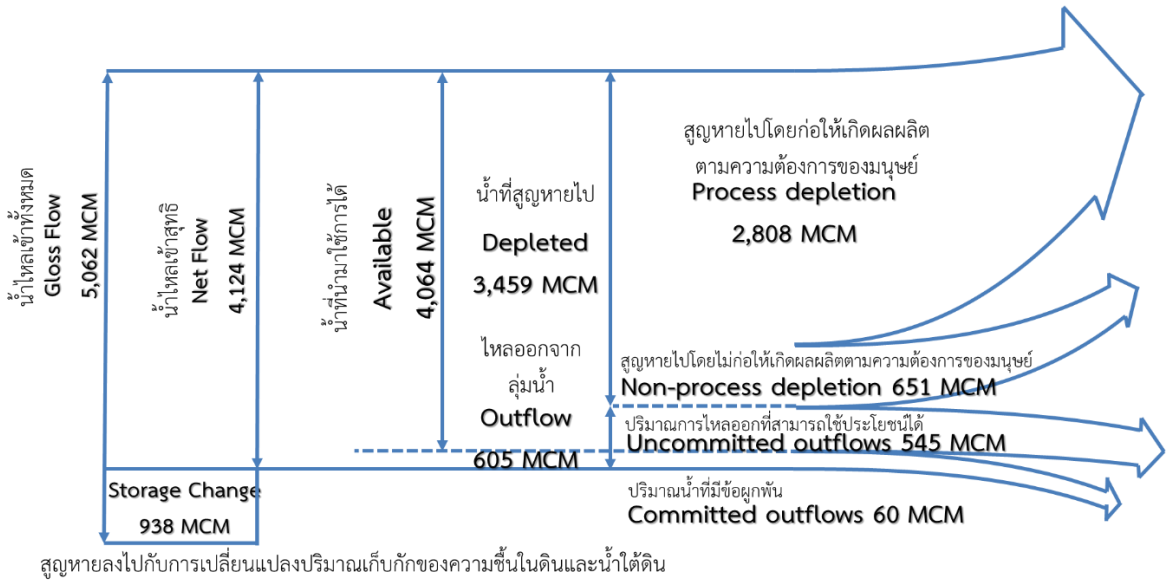
4.5.11 การวิเคราะห์บัญชีน้ำ (Water Accounting)

วิเคราะห์บัญชีน้ำของลุ่มน้ำห้วยหลวง ระหว่างปี พ.ศ. 2554-2565 เพื่อให้ทราบถึงปริมาณน้ำที่เข้าสู่ลุ่มน้ำและปริมาณการสูญเสียน้ำที่เกิดขึ้น ใช้หลักการเบื้องต้นของการทำสมดุลน้ำ โดยพิจารณาปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและปริมาณน้ำที่ไหลออกจากหน่วยพิจารณา โดยใช้ข้อมูลจากผลการประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง SWAT แยกองค์ประกอบของสมดุลน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อยออกเป็นสองส่วนหลัก คือปริมาณน้ำเข้าพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่งพิจารณาปริมาณน้ำ (Rainfall) ส่วนที่สองเป็นปริมาณน้ำส่วนที่ออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำ ประกอบด้วยปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากการคายระเหย (Evapotranspiration) และปริมาณน้ำที่ไหลออกจากลุ่มน้ำ (Outflow)

ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ในลุ่มน้ำห้วยหลวงทั้งหมด ประมาณ 1,212 มิลลิเมตร มีปริมาณน้ำไหลเข้าทั้งหมด (Gloss inflow) รวมทั้งสิ้น 5,062 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยสูญหายลงไปกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณเก็บกักของความชื้นในดินและน้ำใต้ดิน (Storage change) จำนวน 938 ล้านลูกบาศก์เมตร เป็นปริมาณน้ำไหลเข้าสุทธิ (Net Flow) จำนวน 4,124 ล้านลูกบาศก์เมตร มีปริมาณน้ำที่นำมาใช้ได้ (Available water) รวมทั้งสิ้น 4,064 ล้านลูกบาศก์เมตร แบ่งเป็นปริมาณน้ำที่สูญหายไป (Depleted water) รวมทั้งสิ้น 3,459 ล้านลูกบาศก์เมตร แยกเป็นปริมาณน้ำที่สูญหายไปโดยก่อให้เกิดผลผลิตตามความต้องการของมนุษย์ (Process depletion) มีปริมาณ 2,808 ล้านลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 81.18 % ของปริมาณน้ำที่สูญหายไป และปริมาณน้ำที่สูญหายไปโดยไม่ก่อให้เกิดผลผลิตตามความต้องการของมนุษย์ (Non process depletion) ปริมาณ 651 ล้านลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 18.82 % ของปริมาณน้ำที่สูญหายไป ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่เป็นปริมาณคายระเหยของพื้นที่เกษตร เนื่องจากมีพื้นที่ครอบคลุม 65 % ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ในส่วนของปริมาณน้ำไหลออกจากลุ่มน้ำ (Outflow) มีปริมาณน้ำรวมทั้งสิ้น 605 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งในส่วนนี้จะรวมปริมาณน้ำที่มีข้อผูกพัน (Committed outflow) เป็นปริมาณน้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศน์ของลำน้ำมีปริมาณน้ำ 60 ล้านลูกบาศก์เมตรดังแสดงใน**ตารางที่ 7** และ**รูปที่ 23**

ตารางที่ 7 สมดุลน้ำระหว่างปี พ.ศ. 2554-2565

ส่วนประกอบ	ปริมาณน้ำ (MCM)
Gross inflow	
-Net inflow	4,124
-Storage change	938
Gross inflow	5,062
Depletive water	
-Process depletion	2,808
-Non-process depletion	651
Total depletive	3,459
Outflow	605
-Committed water (ปริมาณน้ำที่มีข้อผูกพัน)	60
-Uncommitted outflow (ปริมาณการไหลออกที่สามารถใช้ประโยชน์ได้)	545
Total Outflow	605
Available water	4,064



รูปที่ 23 บัญชีน้ำลุ่มน้ำห้วยหลวง (Water Accounting) ช่วงปี พ.ศ. 2554-2565

5. ผลสำเร็จของงาน (เชิงปริมาณ/คุณภาพ)

5.1 ผลสำเร็จของงานเชิงปริมาณ

5.1.1 ค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT ในลุ่มน้ำห้วยหลวง จำนวน 1 ชุด

5.1.2 ค่าปริมาณน้ำฝนและค่าปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย ในลุ่มน้ำห้วยหลวงในช่วงปี พ.ศ. 2554-2565 จากการประเมินด้วยแบบจำลอง SWAT

5.1.3 บัญชีน้ำ (Water Accounting) ในลุ่มน้ำห้วยหลวง 1 ชุด

5.2 ผลสำเร็จของงานเชิงคุณภาพ

5.2.1 ฝ่ายสารสนเทศและพยากรณ์น้ำ ส่วนอุทกวิทยา มีเครื่องมือและชุดพารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้ประเมินและคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวง

5.2.2 การจัดทำบัญชีน้ำ (Water Accounting) ลุ่มน้ำห้วยหลวง ด้วย SWAT สามารถทราบถึงน้ำต้นทุนและปริมาณการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ในลุ่มน้ำ เพื่อวางแผนจัดการทรัพยากรน้ำได้มีประสิทธิภาพขึ้น

6. การนำไปใช้ประโยชน์/ผลกระทบ

6.1 การนำไปใช้ประโยชน์

6.1.1 ผู้ที่สนใจศึกษาวิธีการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวง สามารถนำเทคนิคและวิธีการตั้งค่าแบบจำลอง SWAT และ SWAT-CUP รวมถึงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการศึกษาในครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อการพัฒนาแบบจำลองในลุ่มน้ำห้วยหลวง หรือลุ่มน้ำอื่น ๆ

6.1.2 ทราบถึงปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวง และทราบถึงลักษณะทางอุทกวิทยาของลุ่มน้ำห้วยหลวง สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการศึกษาวิจัยทางอุทกวิทยาต่อไป

6.1.3 มีข้อมูลบัญชีน้ำ (Water Accounting) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือประกอบการพิจารณาการวางแผนบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำห้วยหลวง ช่วยลดการสูญเสียน้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ช่วยประเมินประสิทธิภาพของการใช้น้ำในพื้นที่และทำให้สามารถกำหนดแนวทางการปรับปรุงการใช้น้ำในแต่ละกิจกรรมให้มีความยั่งยืน มีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด

6.2 ผลกระทบ

6.2.1 มีการพัฒนาการประเมินน้ำท่าด้วยจำลอง SWAT และ SWAT-CUP ในลุ่มน้ำอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้น

6.2.2 การบริหารจัดการน้ำและการวางแผนการใช้ประโยชน์ทรัพยากรน้ำด้วยข้อมูลบัญชีน้ำ (Water Accounting) ในลุ่มน้ำห้วยหลวงมีประสิทธิภาพขึ้น

7. ความยุ่งยากและซับซ้อนในการดำเนินการ

7.1 การประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT จำเป็นต้องมีความรู้ความชำนาญเกี่ยวกับข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ เนื่องจากแบบจำลอง SWAT ใช้ข้อมูลภูมิสารสนเทศหลายชนิดในการนำเข้ามาวิเคราะห์ในแบบจำลอง ซึ่งข้อมูลจะต้องได้รับการตรวจสอบ วิเคราะห์ ปรับแก้และประมวลผลก่อนนำเข้าแบบจำลอง SWAT

7.2 การตรวจสอบแบบจำลอง (Calibration) ด้วยโปรแกรม SWAT-CUP จำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจด้านอุทกวิทยาและมีความเข้าใจพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดน้ำท่า ซึ่งจะแปรฝันตามลักษณะกายภาพ ภูมิอากาศในแต่ละพื้นที่

8. ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการ

8.1 ข้อมูลปริมาณน้ำฝนบางช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง เกิดจากข้อจำกัดของอุปกรณ์การตรวจวัดปริมาณน้ำฝน เช่น การเกิดสัญญาณรบกวนและการเกิดฝนตกหนักมากทำให้เครื่องมือขัดข้อง

8.2 มีการบริหารจัดการน้ำด้วยฝายและประตูระบายน้ำในลุ่มน้ำห้วยหลวงหลายจุด ส่งผลให้ผลลัพธ์จากแบบจำลองได้มีความคลาดเคลื่อนไม่ตรงกับค่าตรวจวัด ทำให้ยากต่อการสอบเทียบแบบจำลอง

9. ข้อเสนอแนะ

9.1 เพื่อให้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนมีความต่อเนื่องจึงควรพิจารณาเลือกวิธีการเติมข้อมูลฝนในช่วงที่ขาดหายไปด้วยวิธีที่เหมาะสม จำเป็นต้องใช้สถานีตรวจวัดปริมาณน้ำฝนข้างเคียงมาช่วยในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนที่ขาดหายไป ซึ่งการศึกษานี้ได้ใช้วิธีค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) เพื่อให้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่นำมาวิเคราะห์มีความต่อเนื่องและเพียงพอในการนำเข้าประมวลผลในแบบจำลอง

9.2 ควรมีการสำรวจที่ตั้งอาคารชลประทานในลำน้ำห้วยหลวงและบันทึกข้อมูลปริมาณน้ำไหลผ่านเพื่อนำมาเป็นข้อมูลสนับสนุนในการเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น

10. การเผยแพร่ผลงาน

10.1 เผยแพร่ผ่านเว็บฝ่ายสารสนเทศและพยากรณ์น้ำ ส่วนอุทกวิทยา https://water.rid.go.th/hyd/download/Huai_Luang_SWAT.pdf

11. ผู้มีส่วนร่วมในผลงาน

1. นางสาวฤทัยทิพย์ มะมา หัวหน้าฝ่ายสารสนเทศและพยากรณ์น้ำ ส่วนอุทกวิทยา สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา ทำหน้าที่ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและรูปเล่มรายงาน เพื่อให้งานถูกต้องตามหลักวิชาการ
สัดส่วนผลงานร้อยละ 20

ขอรับรองว่าผลงานดังกล่าวข้างต้นเป็นความจริงทุกประการ

(ลงชื่อ).....
ผู้ขอประเมิน
วันที่.....

ขอรับรองว่าสัดส่วนการดำเนินการข้างต้นเป็นความจริงทุกประการ

รายชื่อผู้มีส่วนร่วมในผลงาน	**ลายมือชื่อ**
1. นางสาวฤทัยทิพย์ มะมา	

ได้ตรวจสอบแล้วขอรับรองว่าผลงานดังกล่าวข้างต้นถูกต้องตรงกับความเป็นจริงทุกประการ

(ลงชื่อ) .....
(นายสมคิด สะเภาคำ)
ผอช.ภาคเหนือตอนล่าง
วันที่ .....

(ลงชื่อ) .....
(นายธเนศร์ สมบูรณ์)
ผส.บอ
วันที่ .....

เอกสารอ้างอิง

กมลพัฒน์ ตันติสุวณิชย์กุล. (2562). การสร้างฝนกริดแบบรายเดือนสำหรับประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลฝนจากสถานีตรวจวัดและผลิตภัณฑ์การรับรู้จากระยะไกล. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณิดา ภูคงน้ำ. (2561), การประเมินน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำยม โดยแบบจำลอง SWAT. พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร.

เทวินทร์ แก้วเมืองมูล. (2552). การประเมินประสิทธิภาพการใช้น้ำเพื่อการเกษตรในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ทา จังหวัดลำพูน โดยใช้แบบจำลอง SWAT. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

บุญศิริ ศิริสวัสดิ์. (2554). การจัดทำแผนที่ Layout. สืบค้น เมื่อวันที่ 28 มกราคม 2565, จาก https://www.gotoknow.org/posts/450967

ปิยะวัฒน์ วุฒิชัยกิจเจริญ. (2556). การศึกษาปริมาณน้ำท่าและตะกอนลุ่มเชิงน้ำโดยใช้ แบบจำลอง SWAT ในลุ่มน้ำแม่แจ่ม. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา ภาพพายัพ.

วราวุธ วุฒิวณิชย์. (2545). อุทกวิทยาทางวิศวกรรม. นครปฐม : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

สันติ ทองพำนัก. (ม.ป.ป.). อุทกวิทยาเบื้องต้น Fundamental of Hydrology. นครปฐม : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

สำนักเทคโนโลยีเพื่อการเรียนการสอน. (2559). แผนที่ GIS. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน.

สิริรักษ์ อินทรักษา. (2555). การประยุกต์เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเพื่อศึกษาปริมาณน้ำท่าโดยใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยา (SWAT) กรณีศึกษา: ลุ่มน้ำแม่จาง จังหวัดลำปาง. ชลบุรี : มหาวิทยาลัยบูรพา.

สุจริต คูณธนกุลวงศ์ (2558). ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกับการวางแผนบริหารจัดน้ำของไทย กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุเพชร จิรขจรกุล. (2555). เรียนรู้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ด้วยโปรแกรม ArcGIS 10.1 for Desktop. นนทบุรี : บริษัท เอ.พี. กราฟฟคดีไซนและการพิมพ จำกัด.

สุวิทย์ นิยมมาก. (2547). กระบวนการปรับเปลี่ยนภูมิปัญญาท้องถิ่นของชุมชนในการจัดการลุ่มน้ำแม่สลอง บ้านจะบูสี อำเภอแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย และบัญชา ขวัญยืน. (2545). การจัดทำบัญชีน้ำในลุ่มน้ำแม่น้ำแม่กลอง กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลักเกษตรศาสตร์.

โอฬาร เวศอุไร. (2548). ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำน่านตอนบน โดยใช้แบบจำลองอุทกวิทยา SWAT. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Arnold JG et al. (2012). SWAT: model use, calibration, and validation. Trans ASAB