



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)  
ปริญญา

การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม สาขา อนุรักษ์วิทยา  
ภาควิชา

เรื่อง ปราบปรามการไม่ชำระของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอน  
แขวนลอย ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่

Hysteresis Loops of Relationship between Runoff Discharge and Suspended Sediment  
Concentration at Huai Ma Nai Sub-watershed, Phrae Province

นามผู้วิจัย นางสาวทองพูน วรกรูธ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมนิมิตร พุกงาม, วท.ศ. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ( ศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งธรรม, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา ( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.ชนิ เอ็มพันธุ์, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr. )  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย  
ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่

Hysteresis Loops of Relationship between Runoff Discharge and Suspended Sediment  
Concentration at Huai Ma Nai Sub-watershed, Phrae Province

โดย

นางสาวทองพูน วรเศรษฐ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

ทองพูน วรเศรษฐ 2553: ปรัชญาการไม่ซำร่อยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหามาใน จังหวัดแพร่ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม) สาขาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมันนิมิตร พุกงาม, วท.ศ. 89 หน้า

ปรัชญาการไม่ซำร่อยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหามาใน จังหวัดแพร่ ได้ดำเนินการวิจัยโดยใช้ข้อมูลเป็นรายนาที่ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2551 ทั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย และรูปแบบของปรัชญาการไม่ซำร่อยระหว่างน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในแต่ละครั้งที่ฝนตก ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของปรัชญาการไม่ซำร่อย และความสัมพันธ์ในแต่ละรูปแบบของปรัชญาการไม่ซำร่อยของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น และน้ำท่าช่วงน้ำลด

ผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์รายเดือนระหว่างปริมาณน้ำท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอยมีรูปแบบสมการเป็นยกกำลัง (power) คือ  $SS = 0.8675R_0^{0.8184}$  เมื่อ SS คือปริมาณตะกอนแขวนลอย มีหน่วยเป็น กิโลกรัม และ  $R_0$  คือ ปริมาณน้ำท่า มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.91

สำหรับรูปแบบปรัชญาการไม่ซำร่อยของฝนที่ตกแต่ละครั้งที่มีข้อมูลสมบูรณ์ทั้งหมด 18 ครั้ง แบ่งได้ 4 รูปแบบ พบรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา 2 ครั้ง เกิดขึ้นเมื่อปริมาณฝน และปริมาณน้ำท่าน้อยถึงปานกลาง ความหนักเบาของฝนน้อยถึงหนักมาก รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา 6 ครั้ง เกิดขึ้นเมื่อปริมาณฝนปานกลาง ปริมาณน้ำทาน้อย ความหนักเบาของฝนหนักมาก ส่วนรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด 7 ครั้ง เกิดขึ้นเมื่อปริมาณน้ำฝนน้อยถึงปานกลาง ปริมาณน้ำทาน้อย ความหนักเบาของฝนหนัก และรูปแบบเส้นเคียวตามด้วยวงรอบ 3 ครั้งเกิดขึ้นเมื่อปริมาณน้ำฝนปานกลาง ความหนักเบาของฝนหนักมาก และปริมาณน้ำทาน้อย

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น และน้ำท่าช่วงน้ำลด พบรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกามีความสัมพันธ์ในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นเป็นรูปแบบ linear และ logarithm ช่วงน้ำลดเป็นรูปแบบ polynomial และ power รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกามีความสัมพันธ์ในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นได้แก่ exponential และ logarithm ช่วงน้ำลดได้แก่ power และ polynomial รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดมีความสัมพันธ์ในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น และช่วงน้ำลดเหมือนกัน คือ exponential, polynomial และ linear และรูปแบบเส้นเคียวตามด้วยวงรอบมีความสัมพันธ์ในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นคือ power, polynomial และ exponential และช่วงน้ำลดได้แก่ power และ exponential

Tongpoon Waracrut 2010: Hysteresis Loops of Relationship between Runoff Discharge and Suspended Sediment Concentration at Huai Ma Nai Sub-watershed, Phrae Province. Master of Science (Watershed and Environmental Management), Major Field: Watershed and Environmental Management, Department of Conservation. Thesis Advisor: Assistant Professor Somnimit Pukngam, Ph.D. 89 pages.

The hysteresis loops of relationship between runoff discharge and suspended sediment concentration at Huai Ma Nai sub-watershed, Phrae province was carried out by using real time data during 2000-2008. The main objectives of this research were to determine relationship between runoff discharge and suspended sediment, hysteresis loops between runoff discharge and suspended sediment concentration of single storm and to classify the hysteresis loops between rising limb and falling limb including study on the factor affecting to hysteresis loops both of rising and falling limb.

The result found that the relationship between monthly runoff discharge and suspended sediment was in power pattern as  $SS = 0.8675R_o^{0.8184}$  when SS was suspended sediment (kg) and  $R_o$  was runoff discharge ( $m^3$ ) with  $R^2$  equal to 0.91.

The hysteresis loops of 18 total storms were classified into 4 types, i.e., 2 storms of clockwise loop occurring when rainfall amount and discharge were low to moderate, low to very high rainfall intensity, 6 storms of counter-clockwise loop when rainfall amount was moderate, very high rainfall intensity and low discharge, 7 storms of figure-eight loop when rainfall amount was low to moderate, high rainfall intensity and low discharge, and 3 storms of single line plus a loop when rainfall amount was moderate, very high rainfall intensity and low discharge.

Regarding the relationship between runoff discharge and suspended sediment concentration in each type of the hysteresis loops of rising limb and falling limb, linear and logarithm pattern, was found on the rising limb of clockwise loop, while the falling limb was in polynomial and power pattern. The rising limb of counter-clockwise loop was in exponential and logarithm pattern, falling limb was in power and polynomial pattern. The relationship of figure-eight loop was in exponential, polynomial and linear pattern both on the rising limb and falling limb. The rising limb of single line plus a loop was in the power, polynomial and exponential pattern, while falling limb was in power and exponential pattern.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมนิมิตร พุกงาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งจธรรมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์วิชา นิยม ประธานการสอบ และ ดร. พงษ์ศักดิ์ วิทวัสชติกุล ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้คำแนะนำในการปรับปรุง แก้ไขข้อบกพร่องจากการสอบ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้อง และสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณ Dr. Olivier Planchon, Mr. Norbert Silvera คุณสมชาย ชุมพล และคุณเศรษฐา ขอสุข เจ้าหน้าที่จากสถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศฝรั่งเศส (IRD) ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับเครื่องเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอย และน้ำท่า ขอขอบคุณ คุณอาทร บุญเสนอ หัวหน้าสถานีวิจัยลุ่มน้ำยมที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ติดต่อประสานงาน และพนักงานทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือทำให้การดำเนินการวิจัยในแต่ละครั้งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบพระคุณกรมพัฒนาที่ดิน ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน

ขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ สำหรับกำลังใจ และการสนับสนุนด้านการศึกษา รวมทั้งทุกคนในครอบครัวที่มีแต่ความรัก ห่วงใย และหวังดี

ขอบคุณพี่น้องสาขาวิชาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อมที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือมาตลอด และขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และช่วยสนับสนุนจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ทองพูน วรกรฐ

พฤษภาคม 2553

## สารบัญ

### หน้า

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| สารบัญ                     | (1) |
| สารบัญตาราง                | (2) |
| สารบัญภาพ                  | (3) |
| คำนำ                       | 1   |
| วัตถุประสงค์               | 2   |
| การตรวจเอกสาร              | 3   |
| อุปกรณ์และวิธีการ          | 35  |
| อุปกรณ์                    | 35  |
| วิธีการ                    | 36  |
| ผลและวิจารณ์               | 40  |
| สรุปและข้อเสนอแนะ          | 71  |
| สรุป                       | 71  |
| ข้อเสนอแนะ                 | 73  |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง       | 74  |
| ภาคผนวก                    | 78  |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน | 89  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                                                         | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 รูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย                                                      | 18   |
| 2 ลักษณะภูมิอากาศของสถานีตรวจอากาศห้วยหมาไน อำเภอร้องกวาง จังหวัดแพร่ ปีพ.ศ. 2550                                                                | 28   |
| 3 ลักษณะภูมิอากาศของสถานีตรวจอากาศห้วยหมาไน อำเภอร้องกวาง จังหวัดแพร่ ปีพ.ศ. 2551                                                                | 29   |
| 4 ปริมาณน้ำฝน ความหนักเบาของฝน ระยะเวลาที่ฝนตก และช่วงเวลาห่างจุดสูงสุดของน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ของปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยในรูปแบบต่าง ๆ | 56   |
| 5 รูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยในแต่ละลักษณะฝน และความหนักเบาของฝน                                                                               | 57   |
| 6 รูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยในแต่ละช่วงปริมาณน้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย                                                                | 59   |
| 7 รูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยในแต่ละช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์                                                                   | 59   |
| 8 สมการความสัมพันธ์น้ำท่าช่วงน้ำขึ้น และน้ำท่าช่วงน้ำลดแต่ละรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอย                                                        | 66   |
| <br>                                                                                                                                             |      |
| ตารางผนวกที่                                                                                                                                     |      |
| 1 เกณฑ์ปริมาณน้ำฝน และความหนักเบาของฝน                                                                                                           | 79   |
| 2 เกณฑ์ปริมาณน้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่                                                          | 79   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่                                                                                                                                                | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 ส่วนประกอบของกราฟน้ำท่า                                                                                                                             | 10   |
| 2 รูปแบบเส้นเคียวตรงแบบเส้นตรง                                                                                                                        | 20   |
| 3 รูปแบบเส้นเคียวตรงแบบโค้งขึ้น และ โค้งลง                                                                                                            | 20   |
| 4 รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา                                                                                                                        | 21   |
| 5 รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา                                                                                                                        | 22   |
| 6 รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด                                                                                                                 | 22   |
| 7 รูปแบบเส้นเคียวตามด้วยวงรอบ                                                                                                                         | 23   |
| 8 พื้นที่ศึกษา และขอบเขตลุ่มน้ำ ลุ่มน้ำย่อยหมาใน อำเภอร่องขวาง จังหวัดแพร่                                                                            | 26   |
| 9 ช่วงน้ำหลาก และแล้งฝน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน จังหวัดแพร่                                                                                     | 30   |
| 10 ลักษณะปฐพีวิทยาในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน จังหวัดแพร่ ปี พ.ศ. 2545                                                                              | 32   |
| 11 การใช้ประโยชน์ที่ดิน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน จังหวัดแพร่ ปี พ.ศ. 2550                                                                        | 33   |
| 12 เครื่องวัดน้ำท่าอัตโนมัติ และเครื่องสูบน้ำเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอย                                                                                 | 35   |
| 13 การเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอย และวัดน้ำท่า ในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหมาใน จังหวัดแพร่                                                                     | 37   |
| 14 ขั้นตอนการศึกษาปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่า กับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยแขวนลอย ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาใน จังหวัดแพร่ | 38   |
| 15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอยรายเดือน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน จังหวัดแพร่                                             | 40   |
| 16 รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2550                                              | 42   |
| 17 รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2551                                             | 42   |
| 18 รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2550                                            | 44   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                    | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 19     | รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2550         | 44   |
| 20     | รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2551         | 45   |
| 21     | รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2551         | 45   |
| 22     | รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2551          | 46   |
| 23     | รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2551          | 46   |
| 24     | รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 27 มิถุนายน พ.ศ. 2550 | 48   |
| 25     | รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2551   | 48   |
| 26     | รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2551  | 49   |
| 27     | รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2551  | 49   |
| 28     | รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2551   | 50   |
| 29     | รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 20 กันยายน พ.ศ. 2550  | 50   |
| 30     | รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน<br>จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2551  | 51   |
| 31     | รูปแบบเส้นเคียวตามด้วยวงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน จังหวัดแพร่<br>เมื่อวันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2550          | 53   |



## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่                                                                                                                     | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 32 รูปแบบเส้นเคียวตามด้วยวงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2550                  | 53   |
| 33 รูปแบบเส้นเคียวตามด้วยวงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2551                   | 54   |
| 34 ปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์                                   | 60   |
| 35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ | 69   |
| 36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยของน้ำท่าช่วงน้ำลด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่   | 70   |
| <br><b>ภาพผนวกที่</b>                                                                                                      |      |
| 1 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2550    | 80   |
| 2 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2551   | 80   |
| 3 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2550   | 81   |
| 4 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2550   | 81   |
| 5 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2551   | 82   |
| 6 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2551   | 82   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่                                                                                                                           | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 7 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย<br>ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2551          | 83   |
| 8 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย<br>ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2551          | 83   |
| 9 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่<br>ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 27 มิถุนายน พ.ศ. 2550 | 84   |
| 10 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่<br>ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2551  | 84   |
| 11 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่<br>ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2551 | 85   |
| 12 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่<br>ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2551 | 85   |
| 13 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่<br>ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2551  | 86   |
| 14 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่<br>ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 20 กันยายน พ.ศ. 2550 | 86   |
| 15 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่<br>ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2551 | 87   |
| 16 ความสัมพันธ์ของรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย<br>ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2550         | 87   |
| 17 ความสัมพันธ์ของรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย<br>ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2550         | 88   |
| 18 ความสัมพันธ์ของรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย<br>ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2551          | 88   |

ปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอน  
แขวนลอย ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่

Hysteresis Loops of Relationship between Runoff Discharge and Suspended  
Sediment Concentration at Huai Ma Nai Sub-watershed, Phrae Province

คำนำ

ตะกอนแขวนลอยเป็นผลที่เกิดมาจากการชะล้างพังทลายของดิน และไหลลงสู่ลำน้ำ ซึ่งเป็นปัญหาที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องด้วยสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยการบุกรุกพื้นที่ป่าไม้บริเวณพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงเพื่อทำการเกษตร และมีการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยขาดหลักการอนุรักษ์ดิน และน้ำ เมื่อมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในแหล่งน้ำมีมาก ส่งผลทำ  
คุณภาพน้ำเสื่อมโทรมไม่สามารถนำมาอุปโภค บริโภคได้

ปัจจัยหลักที่ทำให้ปริมาณตะกอนแขวนลอยมากขึ้นอยู่ปริมาณน้ำท่า การเข้าใจลักษณะ  
การเกิด และการเคลื่อนที่ของตะกอนจะช่วยสนับสนุนในการหาความสัมพันธ์ที่ถูกต้องใกล้เคียง  
สภาพความเป็นจริง และส่งผลดีต่อการทำนายปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำธาร แต่ความสัมพันธ์  
ดังกล่าวผันแปรไปในแต่ละครั้งของการไหลของน้ำท่าทั้งช่วงน้ำขึ้น และช่วงน้ำลดโดยมีรูปแบบ  
แตกต่างกันไป จึงควรมีการสร้างรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยของความสัมพันธระหว่างปริมาณ  
น้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในลำธารในรูปแบบต่าง ๆ โดยเชื่อมโยงกับปัจจัยที่เป็น  
สาเหตุที่ทำให้เกิดความขุ่นขึ้นของตะกอนในลำธาร

พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไนเป็นพื้นที่ต้นน้ำที่โดนบุกรุกทำลายป่าต้นน้ำจนเสื่อมความอุดม  
สมบูรณ์ ลักษณะพืชพรรณ และป่าไม้โดนทำลายจนไม่เหมาะสมเป็นแหล่งต้นน้ำลำธาร มีปัญหา  
ตะกอนแขวนลอยในลำธารสูง และเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ การพยากรณ์ค่าตะกอนแขวนลอยได้ถูกต้อง  
จะช่วยให้การประเมิน และบริหารจัดการพื้นที่ลุ่มน้ำให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นต่อไป

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอย ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่
2. เพื่อสร้าง และแบ่งประเภทของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย (hysteresis loops) ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่
3. เพื่อศึกษาปัจจัยน้ำฝน น้ำท่า ตะกอนแขวนลอย และระยะการเจริญโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่มีผลต่อรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย (hysteresis loops) ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น และน้ำท่าช่วงน้ำลดในแต่ละรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย (hysteresis loops) ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่

## การตรวจเอกสาร

### 1. น้ำท่า

#### 1.1 นิยาม และความหมาย

น้ำที่ปรากฏบนโลกมี 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และไอน้ำ จะเปลี่ยนสถานะวนเวียนกันตลอดเวลา (Hewlet and Nutter, 1969) ปริมาณน้ำทั้งหมดนี้จะหมุนเวียนเป็นวัฏจักร โดยที่ไอน้ำซึ่งมีอยู่ในบรรยากาศทั่วไปตลอดเวลาเมื่อมีมากขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว กลั่นตัวเป็นละอองน้ำ และรวมตัวเป็นหยดน้ำตกลงเป็นฝนสู่ผิวโลก (วีระพล, 2531) น้ำฝนส่วนหนึ่งถูกรองรับหรือถูกยึดไว้ด้วยสิ่งต่าง ๆ เรียกว่าน้ำเกาะยึด (interception) หากน้ำฝนที่ตกลงมามีปริมาณมากกว่าน้ำที่ถูกยึดไว้ น้ำฝนในส่วนเกินจะตกลงสู่ผิวดิน (Kittredge, 1948) ทั้งนี้ น้ำฝนที่ถูกเกาะยึดไว้จะระเหยสู่บรรยากาศไปในที่สุด น้ำฝนที่ไม่ถูกรองรับไว้จะตกสู่ผิวโลก น้ำฝนส่วนที่ตกถึงพื้นดินจะซึมลงสู่ดินด้วยแรงดึงดูดของเม็ดดิน โดยกระบวนการน้ำซึมผ่านผิวดิน (infiltration) (เกษม, 2526) น้ำที่ซึมผ่านผิวดินจะไหลลงในแนวคิ่งเรียกน้ำซึมลึก (percolation) (Hewlet and Nutter, 1969) ลงสู่ดินชั้นล่างจนถึงระดับน้ำใต้ดินที่มีน้ำอิ่มตัวยังอยู่เป็นน้ำใต้ดิน (ground water) ซึ่งมีหลายระดับชั้นแต่น้ำบางส่วนซึมลงดินไปแล้วเกิดมีชั้นดินแน่นทึบขวางอยู่ก็จะไหลไปตามความลาดเทใต้ผิวดินเรียก interflow (วีระพล, 2531) ถ้าปริมาณฝนมากเกินไปความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน และเกินอัตราการซึมน้ำก็จะมีน้ำเอ่อผิวหน้าดิน (excess water) และเมื่อมีปริมาณฝนเพิ่มมากขึ้นน้ำก็บ่าบนผิวดิน (surface runoff หรือ overland flow) น้ำต่าง ๆ เหล่านี้รวมกันเป็นน้ำท่าหรือน้ำไหลในลำธาร (stream flow หรือ channel flow)

จะเห็นได้ว่าแหล่งที่มาของน้ำในลำธารเกิดจากน้ำฝนทั้งสิ้น โดยกระบวนการต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นถ้าสามารถเก็บกักน้ำไว้ในดินได้มากก็จะทำให้การไหลของน้ำท่าสม่ำเสมอ เพราะดินค่อย ๆ ปลดปล่อยน้ำสู่ลำธารทำให้มีน้ำหล่อเลี้ยงลำธารตลอดปี แต่ถ้ามีน้ำไหลบ่าหน้าดินมากจะทำให้มีน้ำมากในช่วงน้ำหลาก และขาดแคลนน้ำในช่วงฤดูแล้ง



## 1.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณ และลักษณะการไหลของน้ำท่า

ปัจจัยที่ควบคุมปริมาณ และลักษณะการไหลของน้ำท่าเป็น 2 ประเภท คือ ลักษณะภูมิอากาศ และลักษณะภูมิประเทศ โดยแต่ละประเภทส่งผลต่อลักษณะทางอุทกวิทยาในกลุ่มน้ำดังนี้

1.2.1 ลักษณะภูมิอากาศ ได้แก่ ฝน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และการระเหยน้ำ โดยเฉพาะฝนที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำท่ามากที่สุด และมีอิทธิพลเป็นอันดับแรกต่อปริมาณน้ำท่า (นิพนธ์, 2527) ปริมาณน้ำท่าจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณฝน ถ้าฝนตกมากกว่า 20 มิลลิเมตร ขึ้นไปอิทธิพลของปัจจัยอื่น ๆ จะมีน้อยมาก ส่วนความหนักเบาของฝนถ้ามีมากเกินไปความสามารถสูงสุดในการซึมซับน้ำของดินแล้วจะทำให้เกิดน้ำไหลบ่าหน้าดิน และน้ำท่าสูงตามไปด้วย เช่น จากการศึกษาของเพ็ญศักดิ์ (2522) พบว่า ในป่าดิบเขาธรรมชาติทางภาคเหนือของประเทศไทย ปริมาณน้ำท่าจะมาจากปริมาณฝนถึงประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณฝนที่ตกทั้งหมด Jitseri (1983) พบว่า ในช่วงฤดูฝน ปริมาณน้ำท่าจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณฝน โดยที่ปัจจัยปริมาณฝนแสดงอิทธิพลต่อปริมาณ และลักษณะการไหลของน้ำท่า และได้ผลสอดคล้องกับบุญช่วย (2536) ได้ศึกษาในกลุ่มน้ำมูล พบว่า ปริมาณน้ำท่าเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณฝน

1.2.2 ลักษณะภูมิประเทศ เช่น ขนาด รูปร่าง ความลาดชันของพื้นที่เป็นต้น ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มีความสัมพันธ์ซึ่งกัน และกัน และต่างก็มีอิทธิพลต่อปริมาณและลักษณะการไหลของน้ำท่า ซึ่งมีผลการศึกษาที่ผ่านมาน่าสนใจดังนี้

1) ขนาดของพื้นที่ลุ่มน้ำที่แตกต่างกัน จะให้ปริมาณน้ำท่าแตกต่างกันโดย Hewlet and Nutter (1969) กล่าวว่า ขนาดรูปร่าง และความลาดชันของพื้นที่ลุ่มน้ำมีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นตัวควบคุม โดยที่ขนาด รูปร่าง และความลาดชันนี้มีอิทธิพลต่อปริมาณ และลักษณะการไหลของน้ำท่าอีกต่อหนึ่ง Tayler (1967) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำท่ากับปัจจัยทางธรณีวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำ 12 แห่ง ในประเทศนิวซีแลนด์พบว่า ขนาดแกนยาวของกลุ่มน้ำ และความลาดชันมีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำท่า และนิพนธ์ (2525) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการให้น้ำท่าในกลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือพบว่า ขนาดของพื้นที่ลุ่มน้ำมีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำท่าเป็นอันดับรองลงมาจากปริมาณฝน

## 2) ชนิดดิน ดินต่างชนิดกันมีสมบัติในการดูดซับ และระบายน้ำแตกต่างกัน

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2526) ได้จำแนกชนิดของเนื้อดิน (textural class) เป็น 3 กลุ่ม ประเภทแรกคือ ดินทราย (sandy soils) มีปริมาณทรายมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป ระบายน้ำได้ดีมาก ประเภทที่สอง คือ ดินร่วน (loamy soils) ประกอบด้วยอนุภาคทราย ซิลต์ ดิน ระบายน้ำได้ดีปานกลาง ประเภทที่สาม ได้แก่ ดินเนื้อละเอียด (fine-textured soils) หรือดินเหนียว (clayed soils) มีปริมาณดินเหนียวตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปโดยน้ำหนัก มีการระบายน้ำไม่ค่อยดีหรืออุ้มน้ำได้ดี ดินในป่าดิบเขามีอินทรียวัตถุสูง โครงสร้างเกาะยึดกันดี เนื้อดินร่วนซุย สามารถเก็บกักน้ำไว้ได้มาก ในขณะที่เดียวกันก็จะระบายลงสู่ลำธารได้อย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ ดินที่มีอินทรียวัตถุน้อยจะถูกกัดเซาะได้มากกว่าดินที่มีอินทรียวัตถุมาก และดินเนื้อละเอียดมากจะถูกกัดเซาะได้มากกว่าดินเนื้อหยาบ การศึกษาของบุญปลูก (2523) พบว่า ลักษณะการไหลของน้ำในลุ่มน้ำป่าเบญจพรรณผสมไฟ ซึ่งมีดินต้นมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้น้อยเมื่อฝนตกกระตึบน้ำจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ปริมาณน้ำทำในช่วงน้ำหลากมีถึง 97 เปอร์เซ็นต์ ช่วงแล้งฝนมีเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณน้ำในช่วงน้ำแล้งสัมพันธ์กับลักษณะทางธรณีวิทยาของกลุ่มน้ำ โดยที่กราฟน้ำท่าแตกต่างกันไปตามชนิดหิน ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อน้ำท่าในช่วงน้ำแล้งของพื้นที่ภูเขา

### 1.2.3 ลักษณะพืชพรรณ และการใช้ประโยชน์ที่ดิน พืชพรรณที่ปกคลุมดินช่วยยับยั้งการไหลของน้ำไหลบ่าหน้าดินช่วยลดอัตราหลากของน้ำท่าทำให้น้ำไหลสม่ำเสมอตลอดปี และมีอิทธิพลโดยตรงต่อดิน คือช่วยส่งเสริมสมรรถนะการซึมผ่านผิวดิน (infiltration capacity) ความหนาแน่นรวม (bulk density) ความพรุนของดิน (porosity) และโครงสร้างของดิน (structure) ให้ดีขึ้น ทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ได้มากแล้วค่อย ๆ ปลดปล่อยออกมาเช่น ในป่าดิบเขาธรรมชาติ ปริมาณน้ำท่าส่วนใหญ่เป็นน้ำที่เกิดจากน้ำใต้ผิวดิน (subsurface flow) มากกว่าน้ำผิวดิน (surface flow) (นิวัติ, 2513) เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณไร่ร้างแล้ว พบว่าน้ำไหลบ่าหน้าดินในไร่ร้างมีมากกว่าป่าดิบเขาธรรมชาติ 2 เท่า ดังนั้นการทำลายพืชคลุมดินจึงส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่า

## 2. น้ำไหลบ่าหน้าดิน

### 2.1 ความหมาย และประเภทของน้ำไหลบ่าหน้าดิน

Kirkby (1978 a) กล่าวว่าไว้ว่า กระบวนการน้ำไหลบ่าหน้าดิน (overland flow) คือ การเคลื่อนที่ตามแนวนอนของน้ำฝนที่ตกลงมาบนผิวดิน แล้วไหลลงไปสู่ลำธาร ซึ่งเกิดจากการกระทำของแรงโน้มถ่วงโลก (gravity force) ทั้งนี้มีลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำเป็นแบบแผ่นบาง ๆ (sheet flow) ผ่านตามผิวดินและถือว่าเป็นเพียงจุดเริ่มต้นของกระบวนการไหลของน้ำผิวดินเท่านั้น

เกษม (2539) กล่าวว่า น้ำไหลหน้าผิวดิน เป็นน้ำในส่วนที่เหลือจากการซึมของดินแล้วรวมตัวกันอยู่ชั่วคราวตามผิวดินอันเป็นลักษณะของ depression ต่อไปจะไหลลงสู่ที่ต่ำด้วยทางน้ำเล็ก ๆ ที่สุดท้ายน้ำไหลหน้าผิวดินก็ไหลลงสู่ลำธารเป็นน้ำในลำธาร น้ำที่ไหลไปตามผิวดินจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำนี้เรียกว่า น้ำไหลหน้าผิวดิน (surface flow)

Kirkby (1978 b) ได้กล่าวไว้ว่า การไหลบ่าของน้ำหน้าผิวดิน (overland flow) เกิดขึ้นเมื่ออัตราการตกของฝน (rainfall intensity) มีค่ามากกว่าอัตราการซึมผ่านผิวดิน (infiltration rate) หรือปริมาณการตกของฝน มีมากกว่าค่าความจุความชื้นสูงสุดของดิน ซึ่งทำให้น้ำฝนที่ไม่สามารถซึมลงดินได้ เกิดการไหลเป็นแผ่นบาง ๆ บนผิวดิน หรืออาจเกิดการสะสมในแหล่งเก็บน้ำผิวดิน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อน้ำมีปริมาณมากขึ้นจนเกินความจุของแหล่งเก็บน้ำบนผิวดิน (surface depression) ทำให้เกิดการไหลบ่าหน้าดินเช่นกัน และมีการรวมกันของน้ำไหลบ่าหน้าดินจากแหล่งต่าง ๆ ทำให้มีปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่เคลื่อนที่ลงสู่ลำธาร ทั้งนี้อัตราเร็วของน้ำไหลบ่าหน้าดินขึ้นอยู่กับ ความชัน และลักษณะพื้นผิวของพื้นที่นั้น ๆ โดยอัตราการไหลของน้ำไหลบ่าหน้าดินจะสูงในพื้นที่ที่มีความชันมาก และมีผิวดินที่เรียบสม่ำเสมอ แต่อัตราการไหลของน้ำจะช้าในพื้นที่ที่มีความชันน้อย และผิวดินมีความขรุขระ

Dingman (2002) ได้มีการแบ่งประเภทของการไหลบ่าหน้าดินของน้ำออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

### 2.1.1 การไหลบ่าหน้าดินของน้ำเนื่องมาจากการอิ่มตัวของดินชั้นบน

กระบวนการเกิดน้ำไหลบ่าหน้าดิน (overland flow) ในกรณีนี้ เกิดขึ้นเนื่องจาก เมื่อมีการตกของฝน น้ำฝนที่ตกลงมาถึงพื้นดินจะเกิดกระบวนการซึมผ่านผิวดิน (infiltration) ซึ่งถ้า อัตราการตกของฝนมีมากกว่าอัตราการซึมผ่านน้ำผิวดิน และหรือปริมาณฝนที่ตกลงมามีค่ามากกว่า ค่าความจุความชื้นสูงสุดของดิน ทำให้น้ำที่เหลือจากกระบวนการดังกล่าว เกิดการไหลบนผิวดินไปตามแนวลาดชันของพื้นที่ ซึ่งเกิดจากการกระทำของแรงโน้มถ่วงโลก

### 2.1.2 การไหลบ่าหน้าดินของน้ำเนื่องมาจากการหนุนขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน

กระบวนการเกิดน้ำไหลบ่าหน้าดิน (overland flow) ในกรณีนี้ เกิดขึ้นเนื่องจาก เมื่อมีการตกของฝนเป็นระยะเวลายาวนานต่อเนื่องกันเกิดการสะสมน้ำในดิน และทำให้น้ำใต้ดิน (water table) มีระดับสูงขึ้น ส่งผลให้ดินชั้นบนเกิดการอิ่มตัว และไม่สามารถเกิดกระบวนการซึมผ่านผิวดินได้อีก ดังนั้นจึงทำให้น้ำฝนที่ตกลงมาเกิดการไหลบ่าหน้าดิน ลงไปสู่พื้นที่ด้านล่าง และไหลลงสู่ลำธารในที่สุด

## 2.2 การชะล้างพังทลายดินกับน้ำไหลบ่าหน้าดิน

นิพนธ์ (2545) กล่าวว่า กระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งที่เกิดบนพื้นที่ลาดเท คือ กระบวนการชะล้างพังทลายที่มีน้ำไหลบ่าหน้าดินเป็นตัวการ การเกิดร่องริ้วบนหน้าผิวดินก็เป็นผลเนื่องมาจากการกัดเซาะของน้ำบ่าหน้าดินประการหนึ่ง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าไม่มีร่องริ้วปรากฏให้เห็นตามผิวดินบนพื้นที่ลาดเขา แต่หน้าดินมักถูกชะล้างลงสู่ที่ต่ำด้วยแผ่นน้ำไหลบ่าหน้าดินเสมอ ทำให้สีของหน้าดินจางลงได้ ดังนั้นน้ำไหลบ่าหน้าดินจึงมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการชะล้างพังทลายของดินบนพื้นที่ลาดเขาเป็นอย่างมาก

Kilinc and Richardson (1973) ได้สรุปอิทธิพลของน้ำไหลบ่าหน้าดินต่อการชะล้างพังทลายดินไว้ดังนี้

1) ความเร็วของน้ำไหลบ่าหน้าดิน ระดับความลาดเอียงพื้นที่ และความรุนแรงของฝน ที่ตกเป็นปัจจัยอันสำคัญที่มีผลต่อการชะล้างพังทลายของดิน และการเคลื่อนย้ายตะกอน ความเร็วของน้ำไหลบ่าหน้าดินนั้น มีความสำคัญไม่แต่เพียงในด้านการเคลื่อนย้ายตะกอนเท่านั้น แต่เป็นตัวกำหนดอัตรา และขอบเขตของแรงเฉือน และพลังของการไหลของน้ำไหลบ่าหน้าดินด้วย ถึงแม้ว่าค่าแรงครูดเป็นพารามิเตอร์ตัวสำคัญของพฤติกรรมน้ำไหลบ่าหน้าดิน แต่ตัวในท้องที่จริงได้ยากมากแม้แต่ในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงมีนิยมนิยมนใช้สมการริเกรสชันที่มีตัวแปรง่าย ๆ

2) อัตราการไหลของปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้นประมาณยกกำลัง 3.6 เมื่อมีอัตราความเร็วเฉลี่ยของน้ำไหลบ่าหน้าดินเพิ่มขึ้น 1 เท่าตัว และจะตกประมาณยกกำลังสองของความรุนแรงของฝนที่ตกหนักเพิ่มขึ้น 1 เท่าตัว

3) อัตราน้ำเอ่อผิวดิน และอัตราน้ำไหลบ่าหน้าดินต่างมีความสำคัญเท่าเทียมต่ออัตราการไหลหน้าดินเฉลี่ย และต่อการเคลื่อนย้ายตะกอนโดยน้ำไหลบ่าหน้าดิน

2.3 อิทธิพลของพืชคลุมดิน และมาตรการควบคุมการชะล้างพังทลายดินต่อน้ำไหลบ่าหน้าดิน

Kirkby (1978 b) กล่าวว่า iver การมีพืชคลุมดิน ทำให้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านผิวดินช้าลง และมีโอกาสในการซึมลงสู่ใต้ดินมากขึ้น ซึ่งประโยชน์ในแง่ความสามารถในการกักเก็บน้ำไว้ในพื้นที่ อย่างไรก็ตามความสามารถในการชะลอการไหลของน้ำดังกล่าว ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และชนิดของพืชปกคลุมดิน โดยถ้ามีความหนาแน่นของพืชปกคลุมดินมาก อัตราการไหลของน้ำหน้าผิวดินจะน้อยลง ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณฝนบางส่วนถูกเรือนยอดของพืชปกคลุมยึดไว้ในกระบวนการน้ำพืชยึด รวมทั้งลดความเร็วในการตกกระทบ และลดความเร็วในการเคลื่อนที่บนผิวดินในที่สุด ส่วนในพื้นที่ที่ไม่มีการปกคลุมของพืช น้ำฝนที่ตกลงมาสามารถตกกระทบดินได้โดยตรง ซึ่งนอกจากไม่มีสิ่งกีดขวางช่วยชะลอการไหลของน้ำแล้ว การตกกระทบของเม็ดฝนดังกล่าว ยังทำให้เกิดการแตกของเม็ดดิน (detachment) ซึ่งเม็ดดินดังกล่าวจะอุดช่องว่าง



ภายในโครงสร้างดิน เป็นสาเหตุทำให้กระบวนการซึมน้ำผ่านผิวดินเกิดขึ้นได้น้อยลง และส่งเสริมการเกิดกระบวนการน้ำไหลบ่าหน้าดินให้รุนแรงขึ้นตามไปด้วย

### 3. กราฟการไหลของน้ำหรือกราฟน้ำท่า

#### 3.1 ความหมาย และส่วนประกอบของกราฟน้ำท่า

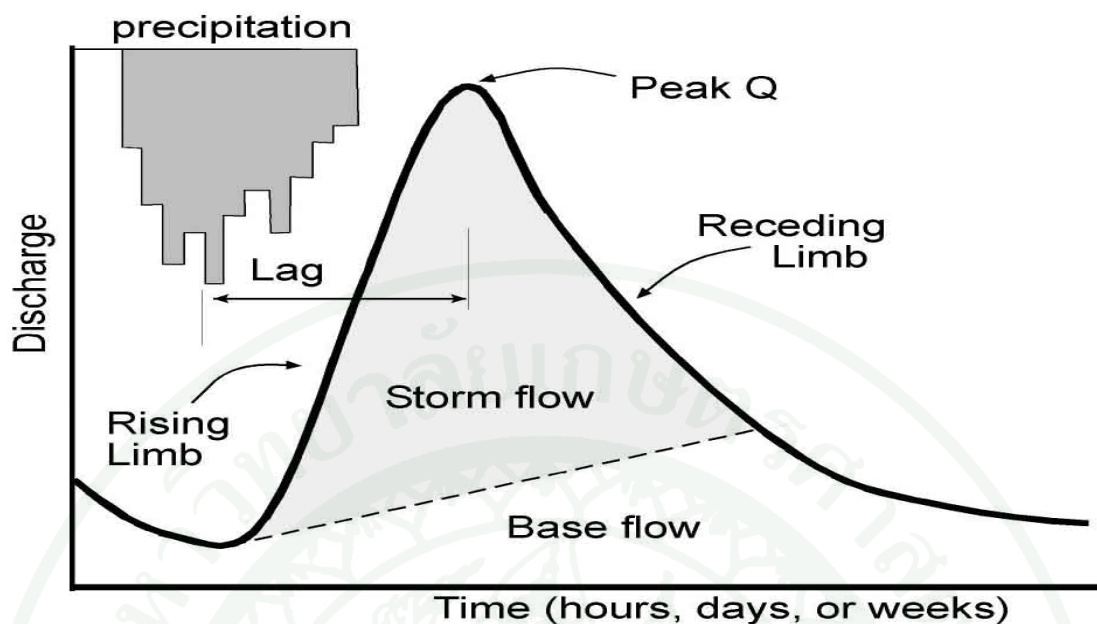
เกษม (2526) กล่าวว่า กราฟน้ำท่ามีความสำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางด้านอุทกวิทยา ซึ่งแสดงความสัมพันธ์หรือการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำหรือปริมาณการไหลของน้ำต่อหน่วยเวลา

กราฟน้ำท่าของแต่ละลุ่มน้ำแสดงสถานะทางอุทกวิทยาที่เป็นลักษณะประจำของแต่ละลุ่มน้ำเข้าไว้ด้วยกันถ้าสภาพของกลุ่มน้ำเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้รูปลักษณะของกราฟน้ำท่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ข้อมูลเกี่ยวกับการไหลของน้ำ เช่น ปริมาณน้ำเฉลี่ย ปริมาณน้ำสูงสุด ต่ำสุด การกระจายความถี่ อัตราการไหลของน้ำในแต่ละฤดูกาล เป็นต้น สามารถคำนวณหาจากกราฟน้ำท่าได้ทั้งสิ้น รูปลักษณะของกราฟน้ำท่าถูกควบคุมโดยปัจจัยที่สำคัญ 2 ชุดด้วยกันคือ ปัจจัยชุดแรกได้แก่ลักษณะของกลุ่มน้ำ เช่น ขนาดและรูปร่างของกลุ่มน้ำ จำนวน และความหนาแน่นของลำธาร สภาพทางธรณีสัณฐานดินเป็นต้น และปัจจัยอีกชุดหนึ่ง ได้แก่ สภาพภูมิอากาศ เช่น ปริมาณและการกระจายของฝน ความหนักเบา และระยะเวลาที่ฝนตก นอกจากนั้นกิจกรรมของมนุษย์ที่เข้าไปเกี่ยวข้อง เช่น การผันน้ำเพื่อการชลประทาน การสร้างอ่างเก็บน้ำ เขื่อนพลังงาน เป็นต้น ล้วนเป็นปัจจัยทำให้รูปลักษณะของกราฟน้ำท่าเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน

#### 3.2 ส่วนประกอบของกราฟน้ำท่า (components of hydrograph)

เกษม (2526) กล่าวว่า กราฟน้ำท่าประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ อยู่ 3 ส่วน (ภาพที่ 1) ดังนี้

3.2.1 ส่วนขึ้น (rising limb) หมายถึงส่วนของกราฟน้ำท่าที่ยกตัวสูงขึ้นอันเนื่องมาจากปริมาณฝนที่ตก และไหลเพิ่มเข้าไปในห้วยธาร ทำให้ปริมาณการไหลของน้ำในลำธารสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ปกติช่วงระยะเวลาก่อนที่จะฝนตก น้ำที่ไหลอยู่ในห้วยธารได้มาจากน้ำใต้ดินที่สะสมอยู่เดิม



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของกราฟน้ำท่า

ที่มา: ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา.(2529)

ค่อย ๆ ไหลออกมา ถ้าฝนไม่ตกระดับน้ำใต้ดินก็จะค่อย ๆ ลดลง ความชื้นในดินก็ลดลงด้วย ทำให้ดินแห้ง และขาดน้ำ เมื่อฝนตกครั้งแรก ๆ น้ำฝนที่ตกลงมาจะสูญเสียไปเนื่องจากถูกสกัดกั้น (interception) จากเรือนยอดของต้นไม้ และพื้นป่า น้ำส่วนนี้จะระเหยไปในที่สุด น้ำฝนบางส่วนยังอยู่ตามแอ่งน้ำตามหลุมตามบ่อหรือไปแทนที่ความชื้นในดินที่แห้งหายไป ในช่วงแรก ๆ ที่ฝนตกจึงยังไม่มีน้ำมากพอที่จะไหลไปตามผิวดินได้ต่อเมื่อฝนตกติดต่อกันนาน ๆ น้ำก็ถูกดินดูดซับซึมผ่านผิวดิน (infiltration) ทำให้ดินมีความชื้นมากขึ้น เมื่อดินอิ่มตัวน้ำบางส่วนก็ไหลลึกลงไปในน้ำใต้ดิน บางส่วนก็ไหลไปตามผิวหน้าดินลงสู่ลำธาร จึงทำให้กราฟน้ำท่ายกตัวสูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นช่วงของ rising limb

3.2.2 ส่วนยอด (peak หรือ crest segment) เป็นส่วนยอดหรือปลายของกราฟน้ำท่าเป็นช่วงเวลาที่ปริมาณการไหลของน้ำสูงสุด (peak) ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ถึงแม้ว่าช่วงนี้ฝนหยุดตกแล้วก็ตาม แต่น้ำที่ไหลบ่าตามผิวหน้าดินก็ยังคงไหลต่อไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะถึงจุดออก (outlet) ซึ่งต้องใช้เวลานานพอสมควรจึงทำให้กราฟน้ำท่ายกตัวสูงขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดสูงสุด

3.2.3 ส่วนลด (recession หรือ falling limb) เมื่อฝนหยุดตกและกราฟน้ำท่าได้ขึ้นไปสูงสุดแล้วประกอบกับน้ำในลำธารได้ไหลออกไปจากลุ่มน้ำทำให้กราฟน้ำท่าค่อย ๆ ลดลงเป็นช่วงที่น้ำในลุ่มน้ำพากันไหลผ่านจุดออกเมื่อไม่มีฝนตกมาเพิ่มกราฟน้ำท่าก็จะลดลงเรื่อย ๆ ส่วนนี้อยู่ต่ำกว่าจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ที่เรียกว่า depletion curve

#### 4. ตะกอน

##### 4.1 นิยาม และความหมาย

นิพนธ์ (2527) กล่าวว่า ตะกอน (sediment) คือ สารหรือวัตถุต่าง ๆ ที่ถูกเคลื่อนย้ายมากับน้ำโดยกระบวนการที่เกิดจากน้ำฝน ลม และแรงโน้มถ่วงของโลก โดยทำให้อนุภาคดินแตกกระจายออกจากกันถูกเคลื่อนย้ายโดยพลังไหลบ่าของน้ำบนผิวดิน แล้วไหลลงสู่ลำธารไปทับถมอีกที่หนึ่ง สารหรือวัตถุต่าง ๆ ที่ถูกเคลื่อนย้ายดังกล่าวนี้อาจเป็นอินทรีย์สารที่มีอยู่ตามธรรมชาติมีขนาดตั้งแต่คอลลอยด์จนถึงหินขนาดใหญ่

ตะกอนโดยทั่วไป แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

- 1) ตะกอนท้องน้ำ (bedload sediment) เป็นตะกอนที่เคลื่อนที่ด้วยการกลิ้งเลื่อนไถลใกล้ท้องน้ำ
- 2) ตะกอนแขวนลอย (suspended sediment) เป็นตะกอนขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยถูกพุงด้วยความปั่นป่วนของน้ำ และตกตะกอนลงสู่ท้องลำธารได้ยากแม้กระแสน้ำจะไหลช้าก็ตาม

##### 4.2 กระบวนการชะล้างพังทลายของดิน และการตกตะกอน

กระบวนการชะล้างพังทลายของดินเริ่มขึ้นเมื่ออนุภาคของดินแตกออกจากกันโดยแรงกระแทกของน้ำฝนที่ตกกระทบเม็ดดินจะเป็นตัวกำหนดความมากน้อยของการแตก และกระเด็นของเม็ดดิน ดินที่ถูกกัดชะแล้วส่วนใหญ่จะถูกเคลื่อนย้ายลงสู่บริเวณที่ต่ำกว่าด้วยพลังน้ำไหลบ่าบนผิวดิน ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความหนักเบาของฝนมีอัตราสูงกว่าอัตราการซึมน้ำได้ของดิน พลังงานของ

น้ำจะพัดพาอนุภาคดินไปกับกระแสน้ำ ในขณะที่เวลาน้ำไหลบ่าหน้าดินยังมีอิทธิพลที่จะขัดถูกัดชะผิวดินให้สูญเสียมวลเพิ่มขึ้นอีกด้วย การพัดพาอนุภาคดินไปกับกระแสน้ำจะสิ้นสุดลงเมื่อน้ำหยุดนิ่ง แล้วอนุภาคของดินที่ถูกพัดพามากก็จะตกตะกอนทับถมบริเวณที่ต่ำหรืออาจถูกพัดพาไปทับถมบริเวณปากแม่น้ำ จึงเป็นการเคลื่อนย้ายความอุดมสมบูรณ์ของดินจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง

สำหรับการชะล้างพังทลายของดินโดยน้ำนั้น เกษม (2539) กล่าวว่า วัฏจักรกระบวนการชะล้างพังทลายของดินแบ่งออกได้ 3 กระบวนการคือ

4.2.1 การแตกกระจาย (detachment) เป็นขั้นแรกของการชะล้างพังทลายที่ทำให้เม็ดดินแตกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก (small particles) และเม็ดดินขนาดเล็ก ๆ เหล่านี้หลุดกระจายไป ซึ่งอาจหลุดจากดินเดิมแล้วกระเด็นออกไปที่อื่นหรืออยู่ใกล้ ๆ บริเวณที่เกิดนั้นได้ แต่การที่ดินแตกกระจายได้มากน้อยเท่าไร ไกลหรือใกล้เพียงไหนนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญสองประการ คือ แรงที่กระทำต่อเม็ดดิน (raindrop impact) และความสามารถในการแตกกระจาย (detachability)

4.2.2 การเคลื่อนย้าย (transportation) เป็นกระบวนการที่สองของการชะล้างพังทลายของดิน สืบต่อจากกระบวนการแรก กล่าวคือ เมื่อเม็ดดินแตกกระจาย และอาจมีการอุดรูพรุนของดินนั้น ทำให้กระบวนการซึมผ่านผิวดินลดลง มีผลทำให้มีน้ำไหลบ่าหน้าดินน้ำจำนวนนี้ไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ อัตราการไหลจะรุนแรงมากน้อยเพียงไร ขึ้นอยู่กับความลาดชันและระยะทางของความลาดชัน

4.2.3 การทับถม (deposition) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการชะล้างพังทลายดิน กล่าวคือ เป็นกระบวนการที่อนุภาคต่าง ๆ จะตกตะกอนนอนกันตามแอ่งน้ำ หรือ ลำธาร สาเหตุอันสำคัญ ก็คือ อัตราความเร็วของกระแสน้ำลดลงและหยุดนิ่งทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity) ส่วนขนาดเล็กเกาะตัวกันเองด้วยแรงประจุ พอมันขนาดใหญ่ที่ทำให้แรงโน้มถ่วงของโลกมีอิทธิพลดึงดูดลงมาได้ แล้วตกตะกอนอีกต่อหนึ่ง หรืออาจตกตะกอนโดยตรงด้วยตัวเองได้แต่ต้องใช้เวลาานาน ในลักษณะเช่นนั้นขนาดเล็กจะใช้เวลากว่าขนาดใหญ่

ภายใต้สภาพธรรมชาติที่ผิวดินปกคลุมด้วยพืชพรรณอย่างหนาแน่น กระบวนการดังกล่าวนี้เกิดขึ้นได้ยาก และช้ามาก และหน้าดินใหม่อันเกิดจากการพัฒนาตัวของดินเป็นไปอย่างสมดุลกับดินที่ถูกชะออกไป การชะล้างพังทลายดินในลักษณะเช่นนี้ เรียกว่าการชะล้างพังทลาย

ตามปกติ (normal soil erosion) หรือการชะล้างพังทลายตามธรรมชาติ (natural soil erosion) หรือการชะล้างพังทลายทางธรณี (geologic soil erosion) นั่นคือ ปริมาณการสูญหายเท่ากับปริมาณดินที่พัฒนาขึ้นมา ดินที่ถูกเคลื่อนย้ายไปจะ ไปทับถมพัฒนาพื้นที่ใหม่ขึ้นเป็นที่ราบสองฝั่งลำน้ำ และปากแม่น้ำ

#### 4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการชะล้างพังทลายดินโดยน้ำ

นิพนธ์ (2545) ได้กล่าวถึงปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการชะล้างพังทลายดินโดยน้ำไว้อย่างละเอียดดังนี้

##### 4.3.1 ปัจจัยลมฟ้าอากาศ

1) อิทธิพลของฝน ปัจจัยอันสำคัญที่สุดในบรรดาปัจจัยเกี่ยวกับลมฟ้าอากาศที่มีอิทธิพลต่อการชะล้างพังทลายของดิน ก็คือ ฝน ทั้งนี้เพราะแรงตกกระทบของเม็ดฝนนับเป็นพลังงานอันแรกที่ทำให้ดินเกิดการแตกแยกออกจากกัน แรงตกกระทบดังกล่าวยังเป็นตัวการต่อเนื่องที่ทำให้เกิดน้ำไหลบ่าหน้าดิน และการเคลื่อนย้ายอนุภาคดินด้วย เกี่ยวกับอิทธิพลของฝนนี้ Wischmeier (1958) พบว่า พารามิเตอร์ของลักษณะฝนที่เกี่ยวข้องในกระบวนการชะล้างพังทลายของดินมากที่สุด คือ ผลคูณของพลังงานจลน์ของฝนที่ตกกับอัตราความหนักเบา 30 นาทีสูงสุดของฝนที่ตกในครั้งนั้น ๆ ซึ่งเรียกผลคูณนี้ว่า rainfall erosion index ( $I_{30max}$ )

ลักษณะอื่น ๆ ของฝนที่เกี่ยวข้องกับการชะล้างพังทลายดิน คือ ลักษณะของการกระจายของฝน (rainfall distribution) ปริมาณการชะล้างพังทลายจะเกิดขึ้นได้สูงสุดเมื่อฝนตกหนัก และหน้าดินว่างเปล่าปราศจากสิ่งปกคลุมหรือในช่วงที่พืชพรรณเพิ่งเริ่มงอกหรือเพิ่งเริ่มตั้งตัวได้

2) อิทธิพลของการเปลี่ยนอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างกลางวัน และกลางคืน หรือระหว่างฤดูกาลนั้น มีผลต่อการปรับตัวของโครงสร้างของดิน ทำให้การจับตัวกันของอนุภาคดินมีแรงยึดกันน้อยลง



#### 4.3.2 ปัจจัยของลักษณะภูมิประเทศ

อิทธิพลของสภาพภูมิประเทศ ได้แก่ ความลาดเท (slope) ความยาวของความลาดเท (slope length) และรูปร่างความลาดเท (slope shape) นับเป็นปัจจัยสำคัญที่ชี้ว่าดินมีการสูญเสียมากน้อยเพียงใด ทั้งนี้อธิบายได้ดังนี้

1) ความลาดเทของพื้นที่ เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในกระบวนการชะล้างพังทลายของดิน โดยทั่วไปแล้วเมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้นอัตราการชะล้างพังทลายดินจะมากขึ้นด้วย ทั้งนี้เพราะพื้นที่ความลาดชันนั้นมักทำให้เกิดน้ำไหลบ่าหน้าดินได้มาก เพราะดินมีโอกาสเก็บกักน้ำฝนที่ตกลงช่วงระยะเวลานั้น ๆ แต่ตกรุนแรง

บนพื้นที่ลาดเทมาก ๆ นั้น เมื่อน้ำไหลบ่าหน้าดินเกิดได้รวดเร็ว พลังน้ำจะกัดกร่อน และพัดพาดินที่ถูกชะล้างลงสู่ที่ต่ำได้มาก อย่างไรก็ตามความลาดชันมีผลเพียงเล็กน้อยในขณะที่ผลตกแผ่วเบา และนานจนกระทั่งน้ำไหลบ่าหน้าดินมีอัตราไหลลงที่ แต่จะมีอิทธิพลรุนแรงมากถ้าฝนตกในช่วงเวลาสั้น ๆ แต่ตกรุนแรง

2) ความยาวของแนวความลาดเท ตามปกตินั้นการชะล้างพังทลายของดินจะเกิดขึ้นไม่ได้ ถ้าพลังการกัดเซาะของน้ำไหลบ่าหน้าดินยังน้อยกว่าแรงต้านทานของเม็ดดิน ปริมาณของดินที่ถูกชะล้างพังทลายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความยาวของความลาดเทที่ยาวมากขึ้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามบนพื้นที่ลาดเขานั้น การกัดกร่อนผิวหน้าดินมักไม่ปรากฏให้เห็นบนบริเวณสันเขา และส่วนที่เป็นเชิงลาดเขาลงมา ในกรณีที่ฝนตกสม่ำเสมอทั่วลาดเขา แต่จะเห็นการชะล้างพังทลายของดินอย่างชัดเจนบริเวณที่ต่ำลงมา ตรงที่ที่น้ำไหลบ่าหน้าดินมีพลังกัดเซาะสูงกว่าแรงต้านทานของอนุภาคดิน ดังนั้นจึงมักเห็นเสมอว่าตามแนวสันเขานั้น จะมีความกว้างอยู่ขนาดหนึ่งซึ่งไม่ค่อยมีการชะล้างพังทลายดินเกิดขึ้นมากนัก ซึ่งความกว้างของแต่ละแนวสันเขานี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการด้วยกัน

เมื่อน้ำไหลบ่าหน้าดินไหลลงสู่ที่ต่ำนั้น ปริมาณดินที่ถูกชะล้างพังทลายจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งพลังการเคลื่อนย้ายของน้ำไหลบ่าหน้าดินหมดสมรรถนะไม่สามารถพัดพาเคลื่อนย้ายมวลดินตะกอนลงสู่ที่ต่ำลงไปได้อีกแล้ว กระบวนการตกตะกอนที่เกิดขึ้น ณ จุดนั้น ๆ ส่วนมากมักเป็นบริเวณใกล้ ๆ สองฝั่งลำธาร ดังนั้นการที่จะลดอัตราและปริมาณการชะล้าง

พังทลายของดินบริเวณลาดเขาควรทำเครื่องกีดขวางทางน้ำเป็นช่วง ๆ ตามลาดเขาด้วยระยะทางที่เหมาะสม

3) รูปร่างของความลาดเท ความลาดเทของพื้นที่ผิวดินหนึ่งอาจมีลักษณะของแนวความลาดเทแบบตรงเรียบหรือลาดนูนขึ้น และโค้งลงหรือลาดเว้าลง และงอขึ้นก็ได้ บนความลาดเทที่โค้งขึ้น (convex) ความลาดเอียงจะมีมากตอนใกล้ ๆ จุดต่ำสุดของแนวความลาดเท ซึ่งเป็นบริเวณที่อัตราการความเร็วของน้ำไหลบ่าหน้าดินจะเพิ่มได้อย่างรวดเร็ว ผลที่ตามมาคือการชะล้างพังทลายของดินมากกว่าความลาดเทแบบอื่น ๆ

บนความลาดเทแบบเว้า (concave) ความลาดเอียงลดน้อยลงตอนบริเวณใกล้จุดสิ้นสุดของความลาดเท ซึ่งมักทำให้เกิดการตกตะกอนบริเวณดังกล่าวนี้ มากกว่าที่จะเกิดการชะล้างพังทลายต่อไป ทั้งนี้เพราะอัตราการไหลบ่าของน้ำหน้าดินและถูกทำให้ลดลงอย่างรวดเร็วนั่นเอง

#### 4.3.3 ปัจจัยเกี่ยวกับดิน

ดินแต่ละชนิดถูกชะล้างพังทลายได้ยากง่ายแตกต่างกันไป แม้ว่าจะถูกชะและถูกเคลื่อนย้ายด้วยแรงปะทะของน้ำฝน และพลังเคลื่อนย้ายของน้ำไหลบ่าหน้าดินในอัตราและปริมาณเดียวกัน บนความลาดเทและพืชพรรณที่คลุมหน้าดินหนาแน่นเท่าเทียมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยเกี่ยวกับสมบัติของดินที่สำคัญดังนี้

1) ความทนต่อการถูกกัดชะและเคลื่อนย้ายในกระบวนการชะล้างพังทลายของดินมี 3 ลำดับขั้นตอน คือ การกัดชะ การเคลื่อนย้าย และการตกทับถม การทดลองในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการในลำดับต่าง ๆ เกิดขึ้นกับดินแต่ละชนิดแตกต่างกันไป โดยทั่วไปความยากง่ายต่อการถูกชะล้างพังทลาย (soil erodibility) เพิ่มขึ้นไปตามขนาดของอนุภาคดิน แต่เป็นไปในทำนองตรงกันข้ามกัน เมื่อกล่าวถึงความยากง่ายในการเคลื่อนย้าย ตัวอย่างเช่น อนุภาคของดินเหนียวยากต่อการกัดชะมากกว่าอนุภาคดินทราย แต่ง่ายต่อการถูกพัดพาเคลื่อนย้ายไปมากกว่าดินทราย เป็นต้น

2) อัตราการซึมผ่านของดิน ความสามารถในการเป็ยกน้ำของดิน และสมรรถนะการอุ้มน้ำสูงสุดของดิน การเคลื่อนย้ายของน้ำจากผิวดินลงสู่ชั้นดินที่ลึกลงไปไม่ว่าจะผ่านลงไปใรรูดินตามธรรมชาติ รอยแยกของดิน รูที่เกิดจากการผุพังของรากไม้ หรือรูที่สัตว์ขุดขึ้น เป็นที่รู้จักกันดีในหมู่นักอนุรักษ์ดิน และน้ำ และเรียกว่า การซึมผ่านผิวดิน (infiltration)

3) ความลึกของดินชั้นบน ดินที่บริเวณหน้าดินถูกกัดชะไปนั้นมักง่ายต่อการถูกชะล้างพังทลายของดิน ทั้งนี้เพราะหน้าดินที่เคยเป็นดินร่วนซุย โครงสร้างดีและอินทรีย์วัตถุสูง ได้ถูกชะล้างไปจนหมดแล้ว ดินที่เหลืออยู่จึงมีสมรรถนะซึมซับน้ำได้น้อยกว่าที่เคยเป็น ทำให้น้ำไหลบ่าหน้าดินเกิดขึ้นได้ง่ายและมาก อัตราการชะล้างพังทลายจึงเป็นไปได้ในอัตราสูง

#### 4.3.4 พืชคลุมดิน

ชนิดของพืชคลุมดิน และลักษณะการปกคลุมผิวน้ำดินนับเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมการชะล้างพังทลายดิน ทั้งนี้เพราะ

- 1) พืชช่วยป้องกันมิให้เม็ดฝนตกกระทบหน้าดินโดยตรง และลดพลังงานของแรงตกกระทบของเม็ดฝน เรือนยอดของต้นไม้ช่วยลดพลังงานที่ตกกระทบเม็ดฝน และความหนาแน่นของลำต้นช่วยลดพลังงานชะล้างพังทลายของน้ำไหลบ่าหน้าดินเป็นอย่างดี
- 2) พืชคลุมดินช่วยทำให้ปริมาณ และอัตราน้ำไหลบ่าหน้าดินลดน้อยลง เป็นผลทำให้กัดชะ และเคลื่อนย้ายดินลดลงตามไปด้วย
- 3) รากของพืชช่วยให้เม็ดดินเกาะกันแน่นขึ้นขณะเดียวกันรากก็ช่วยยึดอนุภาคดิน
- 4) เมื่อพืชตาย ซากที่ผุพังช่วยเชื่อมเม็ดดินให้เกาะกันแข็งแรง และทำให้โครงสร้างดินได้รับการซึมน้ำได้สูง
- 5) กิจกรรมจุลินทรีย์ดินจะมีมาก และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ถ้ามีซากของพืชปะปนอยู่ด้วย

เกษม (2539) กล่าวว่า การสูญเสียดินเป็นปฏิภาคต่อพืชคลุมดินในลักษณะ exponential function ข้อสันนิษฐานนี้ได้ทำการพิสูจน์แล้ว มีแนวโน้มเป็นที่น่าเชื่อถือได้มีข้อสังเกตจากผลการศึกษาของภาควิชาอนุรักษวิทยา (2529) ซึ่งพบว่าพืชคลุมดินที่เหมาะสมนั้นประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

## 5. ปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย

### 5.1 นิยาม

ปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่า (runoff discharge;  $Q$ ) กับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (suspended sediment concentration; SSC) ในแต่ละครั้งที่ฝนตก โดยการวิเคราะห์กราฟน้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยกับเวลา (temporal graph) ในลักษณะของการแผ่ (spread) และการเบนเอียง (skewness) เปรียบเทียบค่า SSC/Q ratio ในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น (rising limb;  $r$ ) กับน้ำท่าช่วงน้ำลด (falling limb;  $f$ ) โดย Williams (1989) ได้อธิบายว่า แนวที่เกิดจากส่วนของกราฟน้ำท่าที่ยกตัวสูงขึ้น และแนวที่เกิดจากส่วนของกราฟน้ำท่าค่อย ๆ ลดลงซึ่งพบว่า ที่ระดับปริมาณน้ำท่าเท่ากันแต่แนวกราฟน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นกับแนวกราฟน้ำท่าช่วงน้ำลดจะทำให้เกิดความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยแตกต่างกัน ปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในแต่ละครั้งที่ฝนตก มีความสำคัญต่อการช่วยประเมินตะกอนแขวนลอยแต่ละเหตุการณ์ที่ฝนตกได้ดีขึ้น และเข้าใจลักษณะการเคลื่อนย้ายตะกอนในลำธารซึ่งมีความสำคัญต่อทางด้านมลพิษ การไหลของตะกอนลงสู่อ่างเก็บน้ำ แหล่งที่อยู่ของสัตว์น้ำ เป็นต้น

### 5.2 รูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย

ลักษณะของกราฟน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยกับเวลา และการเบนเอียงมีอิทธิพลต่อรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอย ส่วนลักษณะการแผ่จะมีผลต่อรายละเอียดของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยโดยเฉพาะความกว้างรูปร่างของรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอย โดย Williams (1989) ได้แบ่งปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอย 5 รูปแบบดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** รูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย

| Class | Relation                | SSC/Q criteria                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Single-valued line      | $(SSC/Q)_r \approx (SSC/Q)_f$<br>A. Slopes of two subsections of the overall relation are equal<br>A. Straight line<br>B. Curve, slope of which increases with increasing values of Q<br>C. Curve, slope of which decreases with increasing values of Q |
| 2     | Clockwise loop          | $(SSC/Q)_r > (SSC/Q)_f$ for all values of Q                                                                                                                                                                                                             |
| 3     | Counter-clockwise loop  | $(SSC/Q)_r < (SSC/Q)_f$ for all values of Q                                                                                                                                                                                                             |
| 4     | Figure eight loop       | $(SSC/Q)_r > (SSC/Q)_f$ for one range of Q values<br>$(SSC/Q)_r < (SSC/Q)_f$ for other range of Q values                                                                                                                                                |
| 5     | Single line plus a loop | $(SSC/Q)_r \approx (SSC/Q)_f$ for one range of Q values<br>$(SSC/Q)_r < /> (SSC/Q)_f$ for other range of Q values                                                                                                                                       |

**หมายเหตุ:**  $(SSC/Q)_r = (SSC/Q)$  on Q graph is rising-limb, for a selected discharge

$(SSC/Q)_f = (SSC/Q)$  on Q-graph is falling limb, paired to a particular  $(SSC/Q)_r$  by

being calculated at same value of Q Dashes mean no reference available

**ที่มา:** Williams (1989)

### 5.2.1 รูปแบบเส้นเดี่ยวตรง (single-valued line)

มีลักษณะเฉพาะคือมีค่า SSC/Q ratio ของกราฟน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นเท่ากับหรือเกือบเท่ากับ SSC/Q ratio ของกราฟน้ำท่าช่วงน้ำลด ซึ่งรูปแบบเส้นเดี่ยวตรงสามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 รูปแบบ คือรูปแบบเส้นตรง (straight line) รูปแบบโค้งขึ้น (curve bending upward) และรูปแบบโค้งลง (curve bending downward) เมื่อปริมาณน้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยเพิ่มขึ้น



### 1) รูปแบบเส้นตรง (straight line)

รูปแบบเส้นตรงเกิดขึ้นเมื่อกราฟปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยเกิดจุดสูงสุดพร้อมกัน และลักษณะการแผ่และการเบนเอียงที่เหมือนกัน โดยที่ค่า SSC/Q ratio ของกราฟน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นจะเป็นค่านี้นี้ slope ของรูปแบบเส้นตรงได้ 3 รูปแบบคือ รูปแบบเส้นตรงที่มี slope เท่ากับ 1 เกิดขึ้นเมื่อค่า SSC/Q ratio ของกราฟปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยเท่ากันทั้งหมด จุดสูงสุดเกิดขึ้นพร้อมกัน และรูปร่าง ขนาดของกราฟทั้งสองสอดคล้องกัน (ภาพที่ 2ก) แต่ถ้ากราฟของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยมีขนาดใหญ่กว่ากราฟปริมาณน้ำท่าจะเป็นรูปแบบเส้นตรงที่มี slope มากกว่า 1 (ภาพที่ 2ข) แต่ตรงกันถ้ากราฟปริมาณน้ำท่ามีขนาดใหญ่กว่ากราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยจะเป็นรูปแบบเส้นตรงที่มี slope น้อยกว่า 1 (ภาพที่ 2ค)

### 2) รูปแบบโค้งขึ้น (curve bending upward)

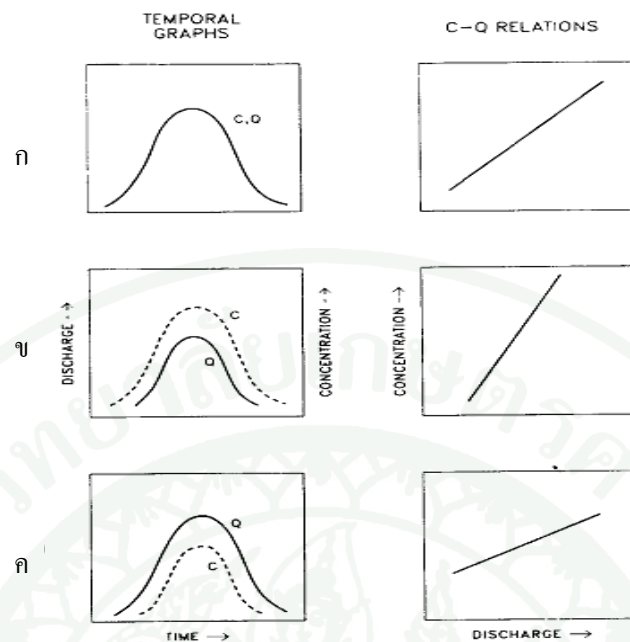
รูปแบบโค้งขึ้นเกิดขึ้นเมื่อจุดสูงสุดของกราฟปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยเกิดขึ้นพร้อมกันมีความสูงเท่ากัน และการเบนเอียงเหมือนกัน แต่ลักษณะการแผ่ต่างกัน โดยที่กราฟปริมาณน้ำท่ามีขนาดใหญ่กว่ากราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (ภาพที่ 3ก)

### 3) รูปแบบโค้งลง (curve bending downward)

รูปแบบโค้งลงเกิดขึ้นเมื่อจุดสูงสุดของกราฟปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยเกิดขึ้นพร้อมกันมีความสูงเท่ากัน และการเบนเอียงเหมือนกัน แต่ลักษณะการแผ่ต่างกัน โดยที่กราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยมีขนาดใหญ่กว่ากราฟปริมาณน้ำท่า (ภาพที่ 3ข)

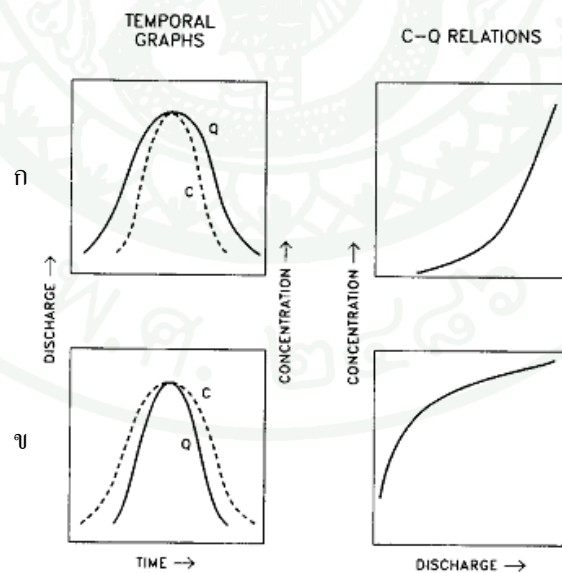
### 5.2.2 รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา (clockwise loop)

ปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยที่เกิดจุดสูงสุดของกราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยก่อนจุดสูงสุดของกราฟปริมาณน้ำท่าหรือเกิดขึ้นพร้อมกัน ลักษณะการแผ่เท่ากันหรือแตกต่างกันก็ได้ แต่การเบนเอียงของกราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นใหญ่กว่าช่วงน้ำลด โดยมีค่า SSC/Q ratio ของกราฟน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นมากกว่าน้ำท่าช่วงน้ำลด (ภาพที่ 4)



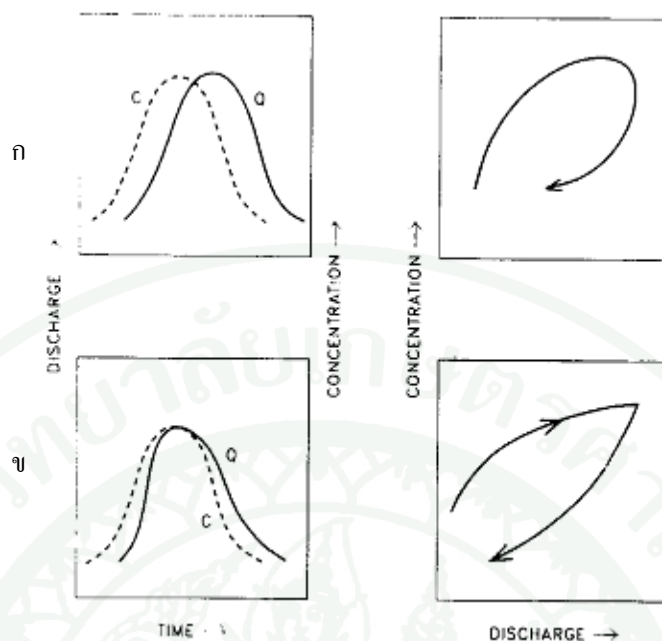
ภาพที่ 2 รูปแบบเส้นเคียวตรงแบบเส้นตรง

ที่มา: Williams (1989)



ภาพที่ 3 รูปแบบเส้นเคียวตรงแบบ โค้งขึ้น และ โค้งลง

ที่มา: Williams (1989)



ภาพที่ 4 รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา

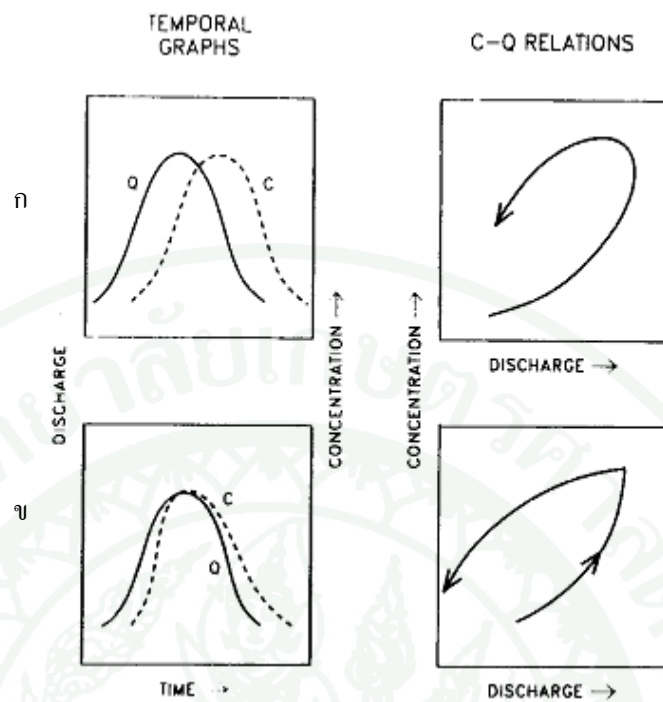
ที่มา: Williams (1989)

### 5.2.3 รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา (counter-clockwise loop)

ปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยที่เกิดจุดสูงสุดของกราฟปริมาณน้ำท่าก่อนจุดสูงสุดของกราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย หรือเกิดขึ้นพร้อมกันก็ได้ มีลักษณะการแผ่เท่ากันหรือแตกต่างกันก็ได้ แต่การเบนเอียงของกราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นน้อยกว่าช่วงส่วลด หรือกล่าวได้ว่ามีค่า  $SSC/Q$  ratio ของกราฟปริมาณน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นน้อยกว่าช่วงน้ำลด ซึ่งเป็นลักษณะตรงกันข้ามกับรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา (ภาพที่ 5)

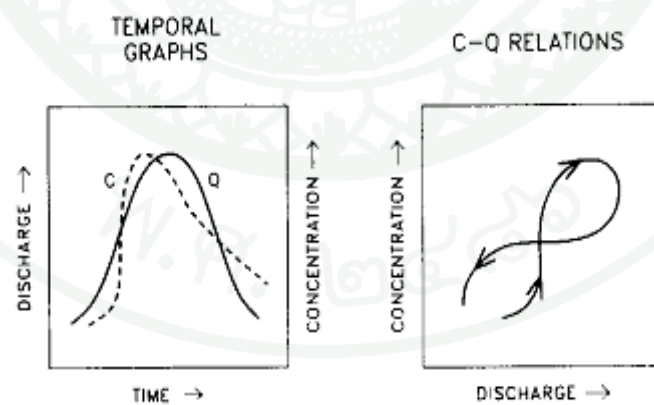
### 5.2.4 วงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด (figure-eight loop)

ปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยที่เกิดร่วมกันระหว่าง 2 รูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย คือรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกากับรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 5 รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ที่มา: Williams (1989)

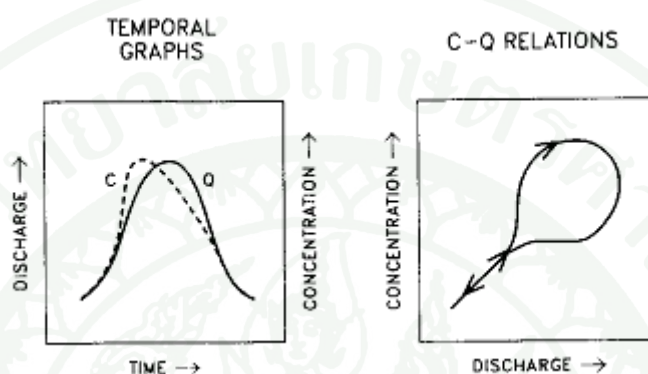


ภาพที่ 6 รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด

ที่มา: Williams (1989)

### 5.2.5 รูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ (single line plus a loop)

ปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยที่เกิดขึ้นระหว่างรูปแบบเส้นเดียวตรงกับรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิการูปแบบใดรูปแบบหนึ่งก็ได้ (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 รูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ

ที่มา: Williams (1989)

## 6. ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย

โดย Williams (1989) ได้อธิบายว่า ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยนั้นมีหลายปัจจัยและแต่ละปัจจัยก็มีผลร่วมกัน ซึ่งแบ่งเป็น 4 ปัจจัยใหญ่ ๆ คือ

6.1 สภาพฝน ได้แก่ ปริมาณฝน ความหนักเบาของฝน และการกระจายของฝน

6.2 น้ำท่า ได้แก่ ปริมาณน้ำท่า อัตราการไหลบ่า อัตราการไหลบ่ากับระยะทางในลำธารสายหลัก



6.3 ตะกอนแขวนลอย ได้แก่ ช่วงเวลาการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย การสะสมของตะกอน และความสามารถของดินที่เกิดการชะล้างได้มากที่สุด แหล่งของตะกอนที่เกิดและสะสมในท้องลำธารเอง ปริมาณ และขนาดของตะกอนมีผลต่อกระบวนการไหลบ่าโดยเฉพาะช่วงกราฟน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น

6.4 การใช้ประโยชน์ที่ดินในแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำมีผลต่อการไหลบ่า และการเกิดตะกอน จะเห็นได้ว่ามีหลายปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ซึ่ง Williams (1989) อธิบายว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับ ช่วงเวลา และปริมาณของตะกอนจากแหล่งของตะกอนทั้งหมดที่เคลื่อนที่มาถึงสถานีวัด และแหล่งของตะกอนที่เกิดขึ้นใกล้หรือไกลจากสถานีวัดรวมถึงพิจารณาเกี่ยวกับเวลาการเคลื่อนที่ และอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลบ่าของน้ำท่า

## 7. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นริสา (2546) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยรายปีในแม่น้ำกับปัจจัยต่าง ๆ ทางด้านน้ำฝน น้ำท่า และคุณลักษณะของกลุ่มน้ำภาคเหนือ และภาคใต้ โดยใช้สมการสหสัมพันธ์ถดถอย (multiple regression analysis) พบว่า ปริมาณตะกอนแขวนลอยมีความสัมพันธ์กับปริมาณฝนของกลุ่มน้ำภาคเหนือ และกลุ่มน้ำภาคใต้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.2-0.6 และ 0.7-0.9 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับปริมาณน้ำท่า ซึ่งมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.1-0.4 และ 0.7-0.9 ตามลำดับ

สุวรรณ (2537) ได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อปริมาณน้ำท่าและตะกอนแขวนลอยในกลุ่มน้ำป่าสัก โดยนำข้อมูลปริมาณน้ำท่า ปริมาณตะกอนแขวนลอย ข้อมูลปริมาณฝน และข้อมูลพื้นที่ป่าไม้มาวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์ถดถอย (multiple regression analysis) พบว่า ปริมาณตะกอนแขวนลอยมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำท่ารายปีมากที่สุด และมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เชิงเส้น

Nadal *et al.* (2008) ได้ศึกษารูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอยของท้องลำธารในกลุ่มน้ำอารากาส (Araguas watershed)

ในประเทศสเปน พบว่า มีทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบ clockwise loop มี 23 เหตุการณ์ รูปแบบ counter-clockwise loop มี 27 เหตุการณ์ และ รูปแบบ figure-eight loop มี 12 เหตุการณ์ โดยรูปแบบ clockwise loop มีลักษณะของการเกิดการไหลบ่าเป็นเวลายาวนาน และมีปริมาณน้ำเท่ากับตะกอนแขวนลอยมาก ส่วนรูปแบบ counter-clockwise loop เกิดการไหลบ่าเพียงเวลาสั้น ๆ และมีปริมาณน้ำเท่ากับตะกอนแขวนลอยปานกลาง และรูปแบบ figure-eight loop มีความหนักเบาผันสูงกว่าเหตุการณ์อื่น ๆ

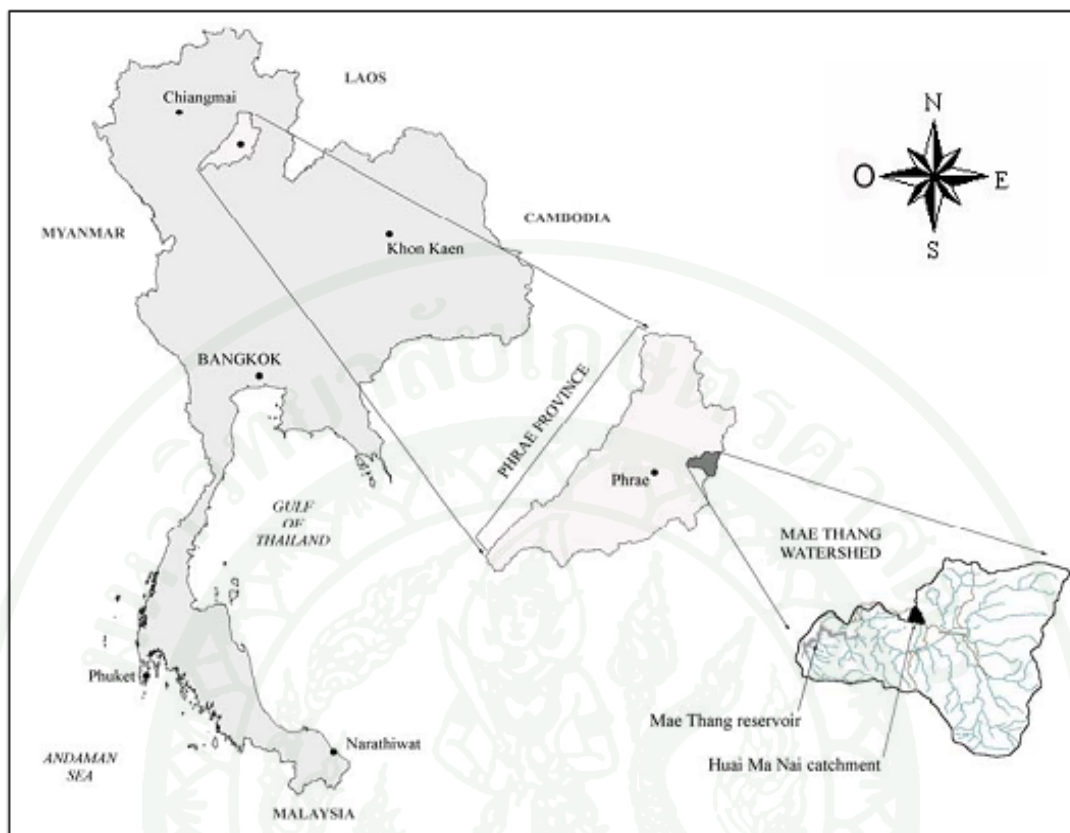
Alexandrov *et al.* (2007) ได้ศึกษาพฤติกรรมของตะกอนแขวนลอยแต่ละช่วงของการเกิดน้ำไหลบ่าในแต่ละเหตุการณ์ และแต่ละฤดูกาลในพื้นที่ตอนเหนือของเนเกฟในประเทศอิสราเอล จากการศึกษาพบว่า ในฤดูใบไม้ร่วง และฤดูใบไม้ผลิจะเกิดปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยรูปแบบ clockwise loop ซึ่งมีความหนักเบาสูง มีน้ำท่ามากแต่ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยน้อยมีค่าเท่ากับ  $10^3$ - $10^4$  มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนฤดูหนาวจะเกิดปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยที่ไม่ใช่รูปแบบ clockwise loop ซึ่งมีน้ำท่าน้อยแต่ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยมากมีค่าเท่ากับ  $10^4$ - $10^5$  มิลลิกรัมต่อลิตร การแบ่งแยกรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยจะแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลซึ่งกันระหว่างน้ำท่ากับตะกอนแขวนลอยในแต่ละเหตุการณ์ และแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ที่เป็นแหล่งการเกิดตะกอน

## 8. พื้นที่ศึกษา

### 8.1 ที่ตั้ง และอาณาเขต

ลุ่มน้ำห้วยหมาโนเป็นลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำสาขาแม่ถางตั้งอยู่ที่ อำเภอร่องขวาง จังหวัดแพร่ ระหว่างละติจูดที่ 18 องศา 09 ลิปดาเหนือ ถึง ละติจูดที่ 18 องศา 16 ลิปดาเหนือ และลองติจูดที่ 100 องศา 19 ลิปดาตะวันออก ถึง 100 องศา 29 ลิปดาตะวันออก เส้นทางการคมนาคมอยู่ห่างจาก จังหวัดแพร่ 40 กิโลเมตร โดยใช้เส้นทางหลวงหมายเลข 101 สายแพร่-น่าน (ภาพที่ 8)

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| ทิศเหนือ    | จรด อำเภอร่องขวาง |
| ทิศใต้      | จรด อำเภอเมือง    |
| ทิศตะวันออก | จรด จังหวัดน่าน   |
| ทิศตะวันตก  | จรด อำเภอร่องขวาง |



ภาพที่ 8 พื้นที่ศึกษา และขอบเขตลุ่มน้ำ ลุ่มน้ำย่อยหามาโน อำเภอร้องกวาง จังหวัดแพร่

ที่มา: ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา (2550)

## 8.2 ลักษณะภูมิประเทศ

พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหามาโนมีขนาด 0.19 ตารางกิโลเมตร ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นภูเขา มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางเฉลี่ยเท่ากับ 399.66 เมตร จุดสูงสุด และต่ำสุด เท่ากับ 460 และ 310 เมตร ตามลำดับ พื้นที่ลุ่มน้ำมีรูปร่างคล้ายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ลักษณะลำธารมีน้ำไหลไม่ตลอดทั้งปี ลุ่มน้ำมีความลาดชันเฉลี่ยเท่ากับ 21.59 เปอร์เซ็นต์ มีทิศด้านลาด คือ ทิศใต้ ลุ่มน้ำมีการระบายน้ำปานกลาง มีความหนาแน่นของลำธารน้อย ลำธารกว้างประมาณ 1 เมตร ท้องลำธารเป็นดินทราย และห้วยหามาโนเป็นลำน้ำสายหลักซึ่งไหลลงสู่แม่น้ำแม่เถางแล้วจึงค่อยไหลลงสู่แม่น้ำยมต่อไป

### 8.3 ลักษณะอุตุ-อุตุนิยมวิทยา

ที่ตั้งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโนอยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของจังหวัดแพร่ ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ฝนที่ตกส่วนใหญ่เป็นแบบฝนพายุคะนอง (thunderstorm precipitation) และฝนภูเขา (orographic precipitation) มีความหนักเบาของฝนและระยะเวลาในการตกไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำในอากาศและลักษณะท้องที่ โดยฤดูฝนเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ฤดูหนาวเริ่มต้นตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมกราคม และฤดูร้อนเริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน

#### 8.3.1 ลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา

ลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาของลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน โดยใช้ข้อมูลการตรวจอากาศของสถานีตรวจอากาศห้วยหมาโน อำเภอวังทอง จังหวัดแพร่ ของปี พ.ศ. 2550 และ 2551 (ตารางที่ 2 และตารางที่ 3) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ปริมาณน้ำฝนรายปีของปี พ.ศ. 2550 เท่ากับ 612 มิลลิเมตร และพ.ศ. 2551 เท่ากับ 928.7 มิลลิเมตร
- 2) อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนของปี พ.ศ. 2550 เท่ากับ 25.6 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 35.7 องศาเซลเซียสในเดือนเมษายน และอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 16.8 องศาเซลเซียสในเดือนมกราคม ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนของปี พ.ศ. 2551 เท่ากับ 25.4 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 34.8 องศาเซลเซียสในเดือนมีนาคม และอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 16.4 องศาเซลเซียสในเดือนธันวาคม
- 3) ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือนของปี พ.ศ. 2550 เท่ากับ 48.4 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 65.5 เปอร์เซ็นต์ ในเดือนสิงหาคม และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดเฉลี่ยเท่ากับ 26.3 เปอร์เซ็นต์ ในเดือนมีนาคม ส่วนความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือนของปี พ.ศ. 2551 เท่ากับ 52.5 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 68.7 เปอร์เซ็นต์ ในเดือนสิงหาคม และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดเฉลี่ยเท่ากับ 33.2 เปอร์เซ็นต์ ในเดือนมีนาคม

ตารางที่ 2 ลักษณะภูมิอากาศของสถานีตรวจอากาศห้วยหมาไน อำเภอวังทอง จังหวัดเพชรบูรณ์ ปีพ.ศ. 2550

| เดือน      | ปริมาณน้ำฝน<br>(มิลลิเมตร) | ความชื้นสัมพัทธ์<br>(เปอร์เซ็นต์) | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) |              |        |
|------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------|--------|
|            |                            |                                   | ต่ำสุดเฉลี่ย            | สูงสุดเฉลี่ย | เฉลี่ย |
| มกราคม     | 0.5                        | 36.7                              | 16.8                    | 30.2         | 22.9   |
| กุมภาพันธ์ | 9.0                        | 28.2                              | 18.1                    | 32.7         | 24.6   |
| มีนาคม     | 0.5                        | 26.3                              | 21.9                    | 35.7         | 28.2   |
| เมษายน     | 47.0                       | 36.8                              | 23.9                    | 35.0         | 29.0   |
| พฤษภาคม    | 157.0                      | 60.4                              | 22.9                    | 31.3         | 26.3   |
| มิถุนายน   | 109.0                      | 58.0                              | 23.4                    | 32.7         | 27.1   |
| กรกฎาคม    | 31.5                       | 57.2                              | 23.0                    | 32.1         | 26.6   |
| สิงหาคม    | 146.0                      | 65.5                              | 22.6                    | 31.3         | 25.8   |
| กันยายน    | 111.5                      | 64.7                              | 22.2                    | 31.5         | 25.7   |
| ตุลาคม     | 0.0                        | 59.0                              | 20.8                    | 31.1         | 24.8   |
| พฤศจิกายน  | 0.0                        | 47.2                              | 17.7                    | 30.0         | 22.8   |
| ธันวาคม    | 0.0                        | 40.8                              | 16.9                    | 31.1         | 23.1   |
| รวม        | 612.0                      | -                                 | -                       | -            | -      |
| เฉลี่ย     | -                          | 48.4                              | 20.9                    | 32.1         | 25.6   |
| สูงสุด     | -                          | 65.5                              | 23.9                    | 35.7         | 29.0   |
| ต่ำสุด     | -                          | 26.3                              | 16.8                    | 30.0         | 22.8   |

ที่มา: สถานีวิจัยลุ่มน้ำยม (2550)



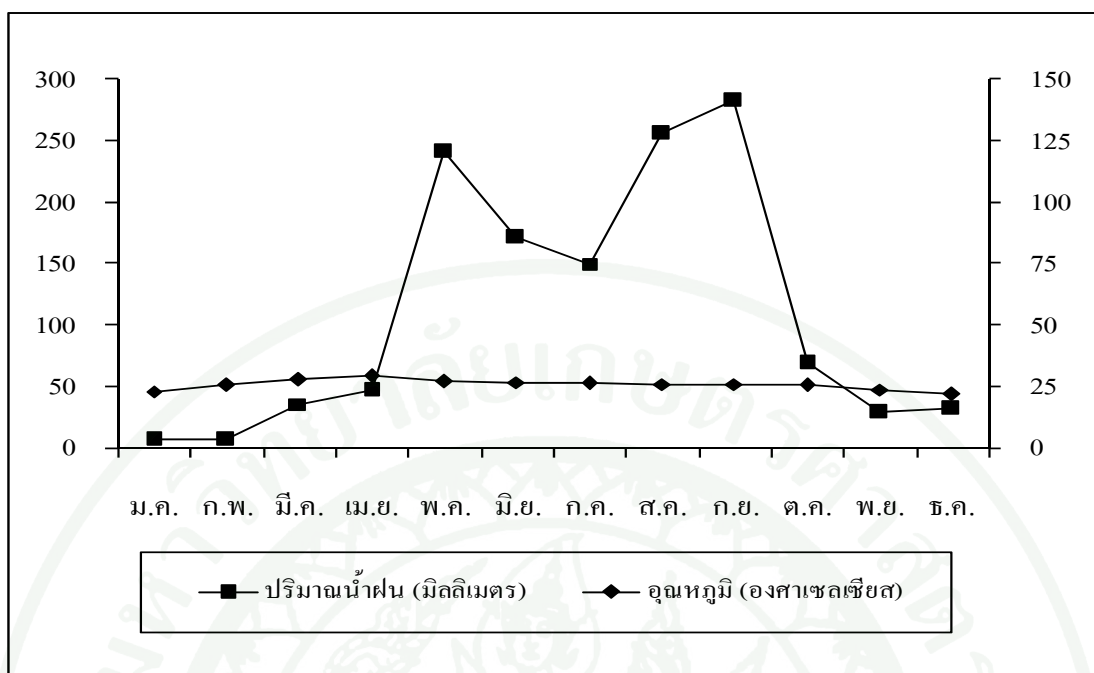
ตารางที่ 3 ลักษณะภูมิอากาศของสถานีตรวจอากาศห้วยหม่าไน อำเภอร่องกาง จังหวัดแพร่  
ปีพ.ศ. 2551

| เดือน      | ปริมาณน้ำฝน<br>(มิลลิเมตร) | ความชื้นสัมพัทธ์<br>(เปอร์เซ็นต์) | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) |              |        |
|------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------|--------|
|            |                            |                                   | ต่ำสุดเฉลี่ย            | สูงสุดเฉลี่ย | เฉลี่ย |
| มกราคม     | 1.4                        | 38.5                              | 17.4                    | 30.8         | 23.4   |
| กุมภาพันธ์ | 2.6                        | 43.8                              | 19.2                    | 30.3         | 24.0   |
| มีนาคม     | 1.5                        | 33.2                              | 22.1                    | 34.8         | 27.6   |
| เมษายน     | 52.3                       | 45.8                              | 24.0                    | 34.5         | 28.4   |
| พฤษภาคม    | 187.6                      | 58.4                              | 23.0                    | 31.4         | 26.4   |
| มิถุนายน   | 79.5                       | 55.3                              | 23.2                    | 32.4         | 26.7   |
| กรกฎาคม    | 171.1                      | 66.2                              | 22.6                    | 32.6         | 25.7   |
| สิงหาคม    | 134.4                      | 68.7                              | 22.5                    | 30.9         | 25.6   |
| กันยายน    | 261.3                      | 65.3                              | 22.3                    | 31.9         | 25.3   |
| ตุลาคม     | 0                          | 58.7                              | 20.7                    | 33.5         | 25.3   |
| พฤศจิกายน  | 0                          | 51.4                              | 17.9                    | 32.1         | 23.6   |
| ธันวาคม    | 0                          | 44.8                              | 16.4                    | 31.0         | 22.4   |
| รวม        | 928.7                      | -                                 | -                       | -            | -      |
| เฉลี่ย     | -                          | 52.5                              | 21.0                    | 32.2         | 25.4   |
| สูงสุด     | -                          | 68.7                              | 24.0                    | 34.8         | 28.4   |
| ต่ำสุด     | -                          | 33.2                              | 16.4                    | 30.3         | 22.4   |

ที่มา: สถานีวิจัยลุ่มน้ำยม (2550)

### 8.3.2 ลักษณะทางอุทกวิทยา

ช่วงน้ำหลาก มีระยะเวลา 6 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคม ถึงเดือนตุลาคม  
ส่วนช่วงแล้งฝนมีระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึง เดือนเมษายนดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ช่วงน้ำหลากและแล้งฝน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหามาโน จังหวัดแพร่

#### 8.4 ลักษณะทางธรณีและปฐพีวิทยา

##### 8.4.1 ลักษณะทางธรณีวิทยา

จากการตรวจสอบแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี (2518) พบว่า พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหามาโน จังหวัดแพร่ เป็นหินยุคเพอร์เมียน-ไทรแอสซิก ถึง คาร์บอนิเฟอรัส อยู่ในหินมหายุคพาเลโอโซอิก

1) หินยุคเพอร์เมียน-ไทรแอสซิก (Permian triasaic revial; PTR) หินที่พบเป็นหินตะกอน (sedimentary rock) ได้แก่ หินไรโอไลต์ หินแอนดิไซต์ หินทัฟฟ์ และหินกรวดภูเขาไฟ

2) หินยุคเพอร์เมียน (Permian period) หินที่พบได้แก่ หินดินดานสีดำ หินทรายสีเทา หินโคลนสีเทาดำ และหินปูนสีเทาที่มีเชิร์ตโนดูลส์สลับกัน หินปูนที่มีซากดึกดำบรรพ์แทรกสลับด้วยหิน โคลน พบซากดึกดำบรรพ์ เนื้อหินประกอบด้วยชิ้นส่วนของไทรนอยด์สเต็ม หอยสองฝา และสาหร่าย

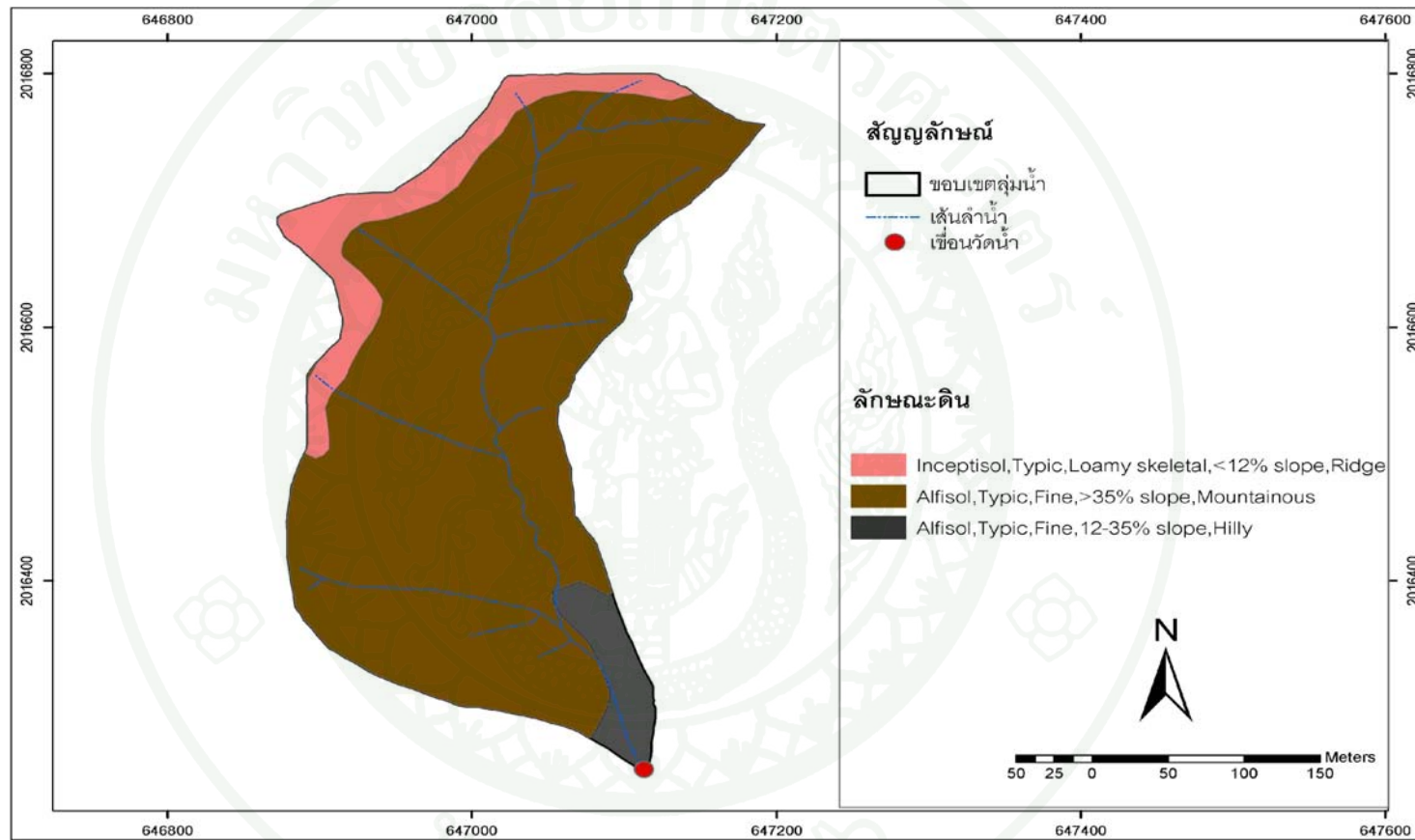
3) หินยุคคาร์บอนิเฟอรัส กลุ่มหินราชบุรี หินที่พบ ได้แก่ หินทรายเนื้อควอร์ต และหินทรายเนื้อเฟลด์สปาร์ (ประกอบด้วยหินแกรนิต หินอาร์โตส หินโปรโตควอร์ตไซต์ และ หินออร์โทควอร์ตไซต์) หินควอร์ตไซต์ และหินดินดาน สีขาว-เขียวจาง ถึงสีน้ำตาลเทา ชั้นหินปาน กลาง ถึงชั้นหนามีสายแร่ควอร์ตซ์

#### 8.4.2 ลักษณะปฐพีวิทยา

ดินที่พบในบริเวณนี้มีลักษณะดินทั้งลึก และตื้น ลักษณะพื้นดินมีความอุดม สมบูรณ์ตามธรรมชาติแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของหินต้นกำเนิด ในพื้นที่พบเศษหินก้อนหรือหิน โผล่กระจายกระจายทั่วไป อันดับดินที่พบในพื้นที่ลุ่มน้ำประกอบไปด้วย 2 อันดับ คือ ดินอัลฟิซอล (Alfisol) ซึ่งเป็นดินที่พบในบริเวณที่ลาดชันสูงรวมไปถึงบริเวณที่เป็นภูเขาสูง นอกจากนี้ในพื้นที่ลุ่ม น้ำยังมีชุดดินอินเซปติซอล (Inceptisol) ซึ่งดินชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นดินเหนียว ถึงเหนียวจัด เนื้อ ดินเป็นดินทราย หนักดินตื้น มีการระบายน้ำดีถึงปานกลาง เพราะเนื้อดินร่วน (loamy skeletal) และมีกรวดทรายปนอยู่มากบนผิวดิน เป็นดินที่ง่ายต่อการถูกชะล้าง และพังทลาย (erosive soil) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2545) ดังภาพที่ 10

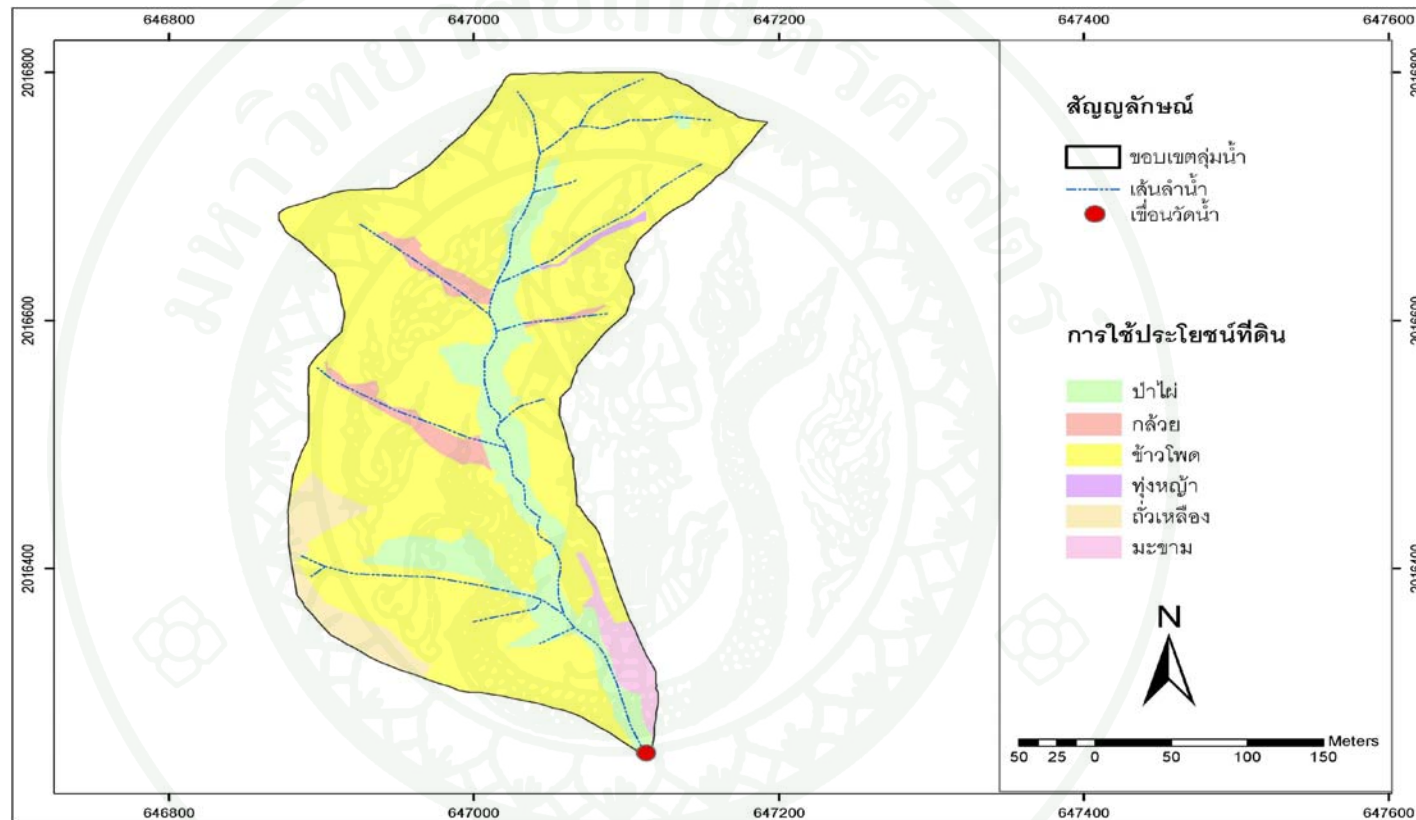
#### 8.5 การใช้ประโยชน์ที่ดิน

การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยแม่ห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ จากแผนที่การใช้ ประโยชน์ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน (2550) พื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมดเป็นพื้นที่เกษตรกรรม (ภาพที่ 11) การเพาะปลูกพืชใช้น้ำจากน้ำฝนในการเพาะปลูกเป็นส่วนใหญ่ โดยพืชที่ปลูกเป็นพืชไร่ โดยเฉพาะ ในพื้นที่บนภูเขา จะเป็นการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และถั่วเหลือง ซึ่งจะเริ่มเตรียมพื้นที่ในการ เพาะปลูกในช่วงเดือนพฤษภาคม โดยการไถพรวน ถางวัชพืช ในพื้นที่ และเริ่มทำการหยอดเมล็ด ข้าวโพด เดือนมิถุนายนถึงกันยายนจะเป็นช่วงข้าวโพดเจริญเติบโตจนถึงเดือนตุลาคมจะเก็บเกี่ยว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และมีการเตรียมพื้นที่ปลูกถั่วต่อไป



ภาพที่ 10 ลักษณะปฐพีวิทยา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ ปี พ.ศ. 2545

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2545)



ภาพที่ 11 การใช้ประโยชน์ที่ดิน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ ปี พ.ศ. 2550

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2550)



## 8.6 สภาพปัญหาของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโนที่ผ่านมา

ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา (2550) ได้ทำการวิเคราะห์ลุ่มน้ำย่อยหมาโน พบว่า ภาพรวมของปัญหามีประเด็นหลัก 2 ประเด็น ดังนี้

1) ปัญหาความเสื่อมโทรมของทรัพยากรต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำมีความแตกต่างกันมากในแต่ละฤดูกาล ปัญหาการชะล้างพังทลายของดิน ปัญหาคุณภาพน้ำ และปัญหาที่สำคัญคือการบุกรุกเข้ามาใช้ประโยชน์ในพื้นที่ป่าไม้ของราษฎรเพื่อทำการเกษตร ทำให้ป่าไม้ถูกทำลาย และมีพื้นที่ป่าไม้ลดลง

2) การใช้ทรัพยากรธรรมชาติของคนในพื้นที่ มีการบุกรุกพื้นที่ป่า และพื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 1A เพื่อมาใช้ในการเกษตร โดยเฉพาะการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และถั่วเหลือง

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. แผนที่ภูมิประเทศบริเวณลุ่มน้ำสาขาแม่ถาง ลำดับชุด L7018 ระวัง 5045 I และ 5045 II มาตราส่วน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร
2. ข้อมูลปริมาณน้ำท่าและปริมาณตะกอนแขวนลอยรายเดือนระหว่างปี พ.ศ. 2543-2551 และข้อมูลปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยรายนาที่ระหว่างปี พ.ศ. 2550-2551 จาก สถานีวิจัยลุ่มน้ำยม กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช
3. เครื่องวัดน้ำท่าอัตโนมัติ (ภาพที่ 12ก)
4. เครื่องสูบน้ำเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอย (ภาพที่ 12ข)
5. ขวดเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอยขนาด 1 ลิตร
6. กรวยกรองตะกอน
7. กระดาษกรอง
8. ตู้อบตะกอน
9. ถาดใส่ตะกอน
10. เครื่องชั่งน้ำหนัก
11. เซ็นเซอร์วัดน้ำแบบ 120°V-notch
12. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
13. อุปกรณ์เครื่องเขียน



(ก) เครื่องวัดน้ำท่าอัตโนมัติ

(ข) เครื่องสูบน้ำเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอย

ภาพที่ 12 เครื่องวัดน้ำท่าอัตโนมัติ และเครื่องสูบน้ำเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอย

## วิธีการ

### 1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

#### 1.1 ข้อมูลปริมาณน้ำท่า

เก็บรวบรวมข้อมูลน้ำท่าจากเขื่อนวัดน้ำแบบ 120° V-notch โดยใช้เครื่องวัดระดับน้ำอัตโนมัติ เก็บรวบรวมข้อมูลทุก 1 นาที ในแต่ละครั้งที่ฝนตกโดยเลือกข้อมูลที่เป็น single storm ที่มีข้อมูลที่สมบูรณ์ที่สุด โดยแบ่งข้อมูลในการวิเคราะห์ดังนี้

- 1) ปริมาณน้ำท่ารายเดือนระหว่างปี พ.ศ. 2543-2551
- 2) ปริมาณน้ำท่าที่เป็น single storm ข้อมูลเป็นรายนาที่ระหว่างปี พ.ศ. 2550-2551

#### 1.2 ข้อมูลปริมาณตะกอนแขวนลอย

การเก็บตัวอย่างปริมาณตะกอนแขวนลอยทำการเก็บข้อมูลโดยเครื่องเก็บรวบรวมตะกอนอัตโนมัติ โดยใช้ขวดพลาสติกปริมาณ 1 ลิตรรองรับน้ำที่ได้จากเครื่องสูบน้ำปากเขื่อนที่ฝนตกแต่ละครั้ง ทุก 1 นาที ดังภาพที่ 13 นำตัวอย่างน้ำที่ได้เก็บมาหาความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในห้องปฏิบัติการ นำตัวอย่างน้ำมากรองด้วยกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนักแน่นอน หลังนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงให้เย็นแล้วจึงชั่งน้ำหนักแห้ง โดยแบ่งข้อมูลในการวิเคราะห์ดังนี้

- 1) ปริมาณตะกอนแขวนลอยรายเดือน ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2551
- 2) ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยรายสตอร์มที่เป็น single storm ข้อมูลเป็นรายนาที่ระหว่างปี พ.ศ. 2550-2551



ภาพที่ 13 การเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอย และวัดน้ำท่า ในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหมาโน จังหวัดแพร่

## 2. ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีขั้นตอนตามภาพที่ 14 โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 รวบรวมข้อมูลจากสถานีวิจัยลุ่มน้ำยม ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

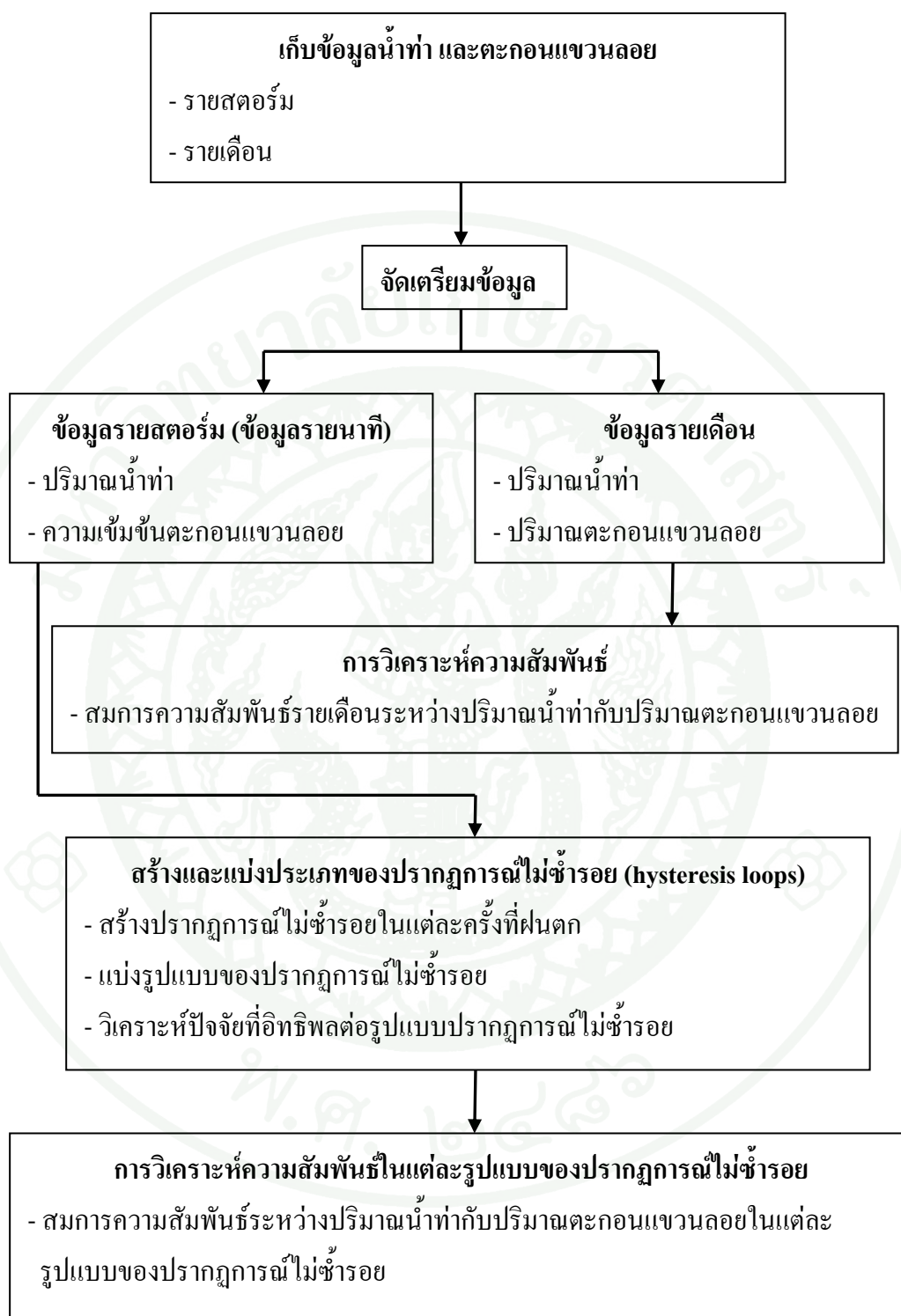
2.2 จัดเตรียมข้อมูล

ข้อมูลรายสัปดาห์และรายเดือนของปริมาณน้ำท่าและตะกอนแขวนลอยโดยแบ่งดังนี้

1) ปริมาณน้ำท่ารายสัปดาห์ที่เป็น single storm และรายเดือน

2) ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยรายสัปดาห์ที่เป็น single storm และปริมาณตะกอนแขวนลอยรายเดือน





**ภาพที่ 14** ขั้นตอนการศึกษาปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับ ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยแขวนลอย ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่



### 3. วิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอยโดยเขียนในรูปของสมการ

$$SS = f(R_0) \quad (1)$$

โดยที่  $SS$  = ปริมาณตะกอนแขวนลอย (ตัน)  
 $R_0$  = ปริมาณน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตร)

โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยรายเดือนซึ่งเป็นตัวแปรตาม (dependent variable) และปริมาณน้ำท่าเป็นตัวแปรอิสระ (independent variable)

3.2 สร้าง และแบ่งรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย (hysteresis loops) ในแต่ละครั้งที่ฝนตก

1) สร้างโดยใช้ข้อมูลน้ำท่า กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยในรูปแบบความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยแต่ละนาที่ที่เกิดเหตุการณ์ที่ฝนตกแต่ละครั้งมา พล็อตกราฟของน้ำท่า (Q-graph) กับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (SSC-graph) ในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งรวมเรียกว่า กราฟน้ำท่าและความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยกับเวลา (temporal graph)

2) สร้างรูปแบบความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยจากกราฟน้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยกับเวลา

3) รวบรวมและแบ่งรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยทั้งหมดที่ได้ศึกษา พร้อมทั้งอธิบายและให้เหตุผลลักษณะโดยทั่วไปในแต่ละรูปแบบ

3.3 วิเคราะห์ปัจจัยทางด้านฝน ได้แก่ ปริมาณฝน ความหนักเบาของฝน ช่วงเวลาการตกของฝน ปัจจัยทางด้านปริมาณน้ำท่า และช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย

## ผลและวิจารณ์

### 1. ความสัมพันธ์รายเดือนระหว่างปริมาณน้ำท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอย

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอยรายเดือนของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาในของกลุ่มน้ำสาขาแม่ตาง จังหวัดแพร่ โดยข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2551 จากการวิเคราะห์สมการถดถอยดังภาพที่ 15 พบว่า มีความสัมพันธ์ค่อนข้างสูงทั้งนี้ เนื่องจากพื้นที่ส่วนมากเป็นดินทราย มีตะกอนล้นถมในลำธาร และมีการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลาดชัน จึงทำให้เมื่อฝนตกเกิดการไหลบ่าทำให้เกิดการพัดพาตะกอนได้มาก โดยมีลักษณะความสัมพันธ์ในรูปแบบยกกำลัง (power) ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 0.91 และมีรูปแบบของสมการดังนี้

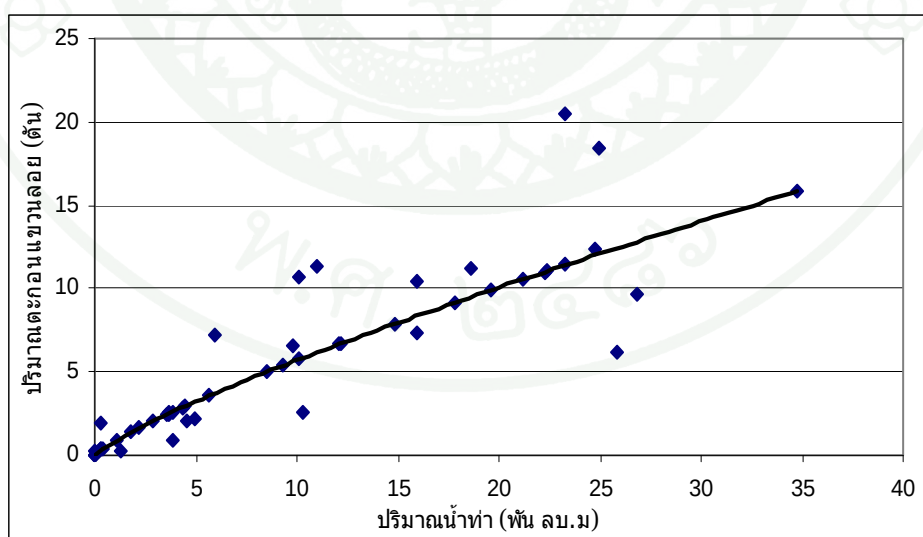
$$SS = 0.8675R_0^{0.8184} \quad (2)$$

$$R^2 = 0.91$$

โดยที่

$SS$  = ปริมาณตะกอนแขวนลอย (ตัน)

$R_0$  = ปริมาณน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตร)



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอยรายเดือน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาใน จังหวัดแพร่

จากสมการความสัมพันธ์ที่ได้  $R^2$  เท่ากับ 0.91 แสดงว่าปริมาณตะกอนแขวนลอยมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำท่าร้อยละ 91 และจากภาพที่ 15 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้น ปริมาณตะกอนแขวนลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

## 2. ปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย (hysteresis loops)

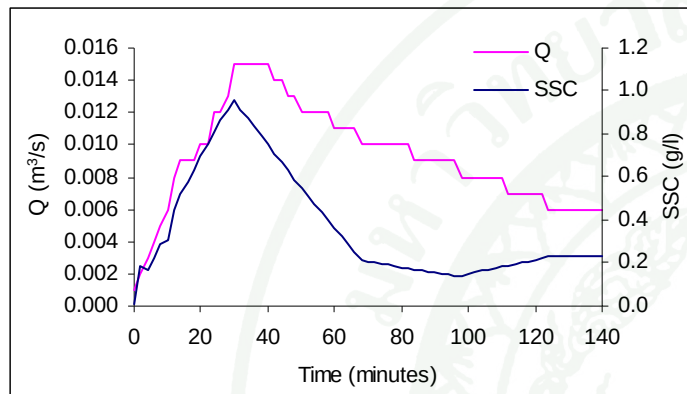
ผลการศึกษาพบว่า ปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จากการศึกษารายการตกของฝนที่เป็น single storm ที่มีข้อมูลสมบูรณ์ ทั้งหมดจำนวน 18 ครั้ง ระหว่างปี พ.ศ. 2550-2551 สามารถแบ่งได้ 4 รูปแบบดังนี้

### 2.1 วงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา (clockwise loop)

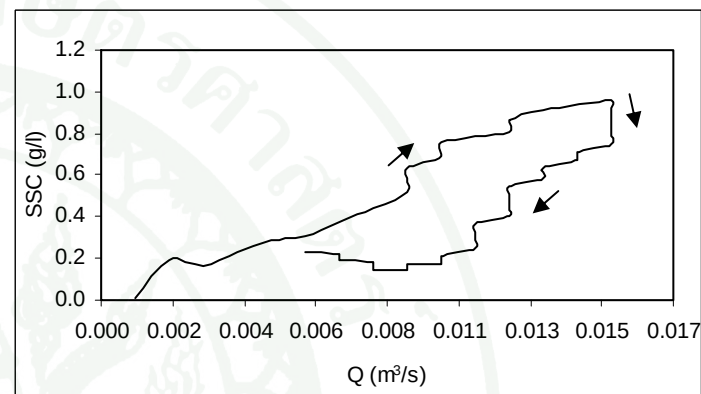
รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกามีทั้งหมด 2 เหตุการณ์ ซึ่งเป็นกราฟปริมาณน้ำท่า (runoff discharge;  $Q$ ) และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (suspended sediment concentration; SSC) กับเวลาที่จุดสูงสุดทั้ง 2 กราฟ (กราฟปริมาณน้ำท่า และกราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย) เกิดขึ้นพร้อมกันในวันที่ 30 และเวลาที่เกิด loop ทั้งหมด 140 นาที ดังเหตุการณ์วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2550 ส่วนจุดสูงสุดของตะกอนแขวนลอย เกิดขึ้นก่อนจุดสูงสุดของน้ำท่าโดยเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในวันที่ 7 และเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในวันที่ 21 ในเหตุการณ์วันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2551

การเบนเอียงของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย หรือค่าความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในช่วงขึ้นมากกว่าช่วงลดยของกราฟน้ำท่า ( $Q$ -graph) โดยมีค่า SSC/ $Q$  ratio ในช่วงน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นมากกว่าช่วงน้ำลด

จากทั้ง 2 เหตุการณ์พบว่า ปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยมี loop ในทิศทางของแกนเป็น 45 องศา แสดงให้เห็นว่ากราฟน้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยกับเวลามีลักษณะการแผ่ การเบนเอียงที่เหมือนกัน และจุดสูงสุดของทั้ง 2 กราฟเกิดขึ้นพร้อมกันหรือในเวลาใกล้เคียงกันดังภาพที่ 16 และภาพที่ 17 ตามลำดับ จึงทำให้เกิด curve ที่สมมาตรกัน และ ปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยมี loop ขนาดที่แคบ ทั้งนี้เนื่องจากทั้ง 2 เหตุการณ์มีระยะเวลาที่จุดสูงสุดห่างกันเพียง 1 นาที และจุดสูงสุดเกิดขึ้นพร้อมกัน อีกทั้งมีลักษณะการแผ่ของทั้ง 2 กราฟ

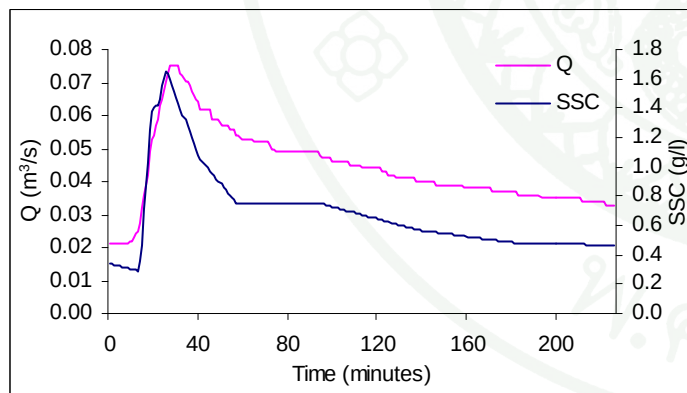


(a) Temporal graph

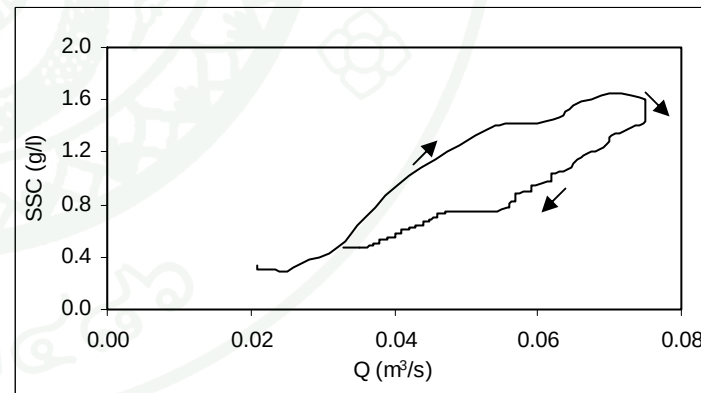


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 16 รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2550



(a) Temporal graph



(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 17 รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2551

(กราฟน้ำท่าและกราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย) ที่เหมือนกัน ส่วนเหตุการณ์วันที่ วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2550 มี loop ที่ยาวกว่าเหตุการณ์วันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2551 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าจุดสูงสุดของกราฟน้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย

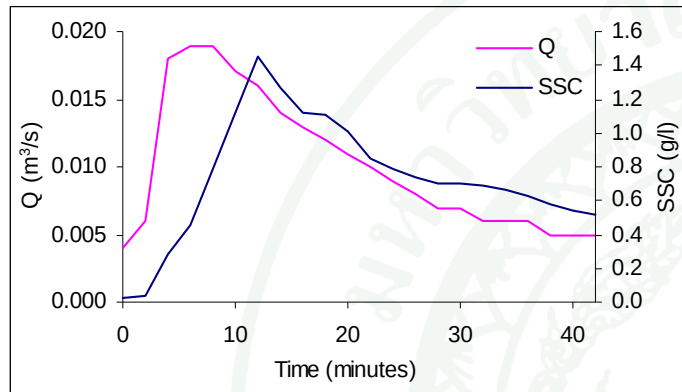
## 2.2 วงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา (counter-clockwise loop)

รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกามีทั้งหมด 6 เหตุการณ์ โดยมีจุดสูงสุดของน้ำท่าเกิดก่อนจุดสูงสุดของตะกอนแขวนลอย (Arnborg *et al.*, 1967) รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา มีการเบนเอียงของกราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยหรือค่าความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ในช่วงส่วนขึ้นน้อยกว่าช่วงส่วนลดของกราฟน้ำท่าโดยมีค่า SSC/Q ratio ในช่วงน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นน้อยกว่าช่วงน้ำลดของค่าทั้งหมด

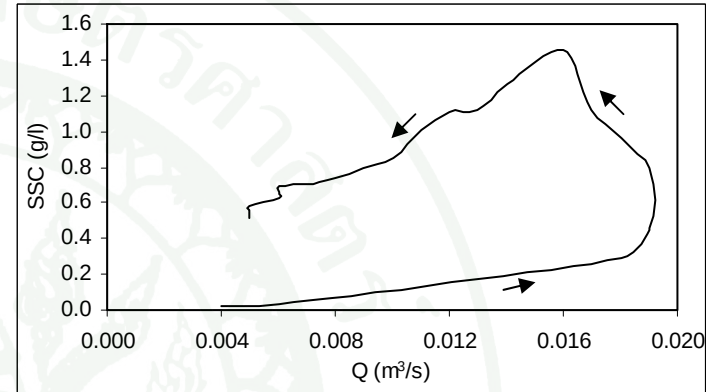
จากการศึกษา loop มีแกนทิศทางที่แตกต่างกัน พบว่า วันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2550 (ภาพที่ 18) มีแกนในทิศทางเป็นแนวอนทางด้านล่าง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกันอย่างมากระหว่างลักษณะการแผ่ของกราฟปริมาณน้ำท่าที่มีขนาดใหญ่กว่าลักษณะการแผ่ของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย โดยเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในนาทิตี่ 6 และเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในนาทิตี่ 12 และในทิศทางตรงกันข้ามถ้าลักษณะการแผ่ของกราฟน้ำท่ามีขนาดเล็กกว่าลักษณะ การแผ่ของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยมาก ๆ ทำให้ loop มีแกนทิศทางแนวโน้มเป็นแนวอนที่อยู่ด้านบน เวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในนาทิตี่ 20 นาที และเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในนาทิตี่ 40 ดังเช่นเหตุการณ์วันที่ 19 เดือน กันยายน พ.ศ. 2550 (ภาพที่ 19) และมี 2 เหตุการณ์ที่มีแกนทิศทาง 45 องศา ได้แก่ เหตุการณ์วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2551 ซึ่งเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในนาทิตี่ 7 และเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในนาทิตี่ 21 (ภาพที่ 20) และ วันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2551 เวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในนาทิตี่ 24 ส่วนเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในนาทิตี่ 36 ซึ่งเกิดจากทั้ง 2 กราฟมีลักษณะการแผ่ และการเบนเอียงที่เหมือนกัน

ปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยที่มี loop แกนยาวที่สุดคือเหตุการณ์ วันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2551 ซึ่งเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในนาทิตี่ 10 และเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในนาทิตี่ 55 (ภาพที่ 21) และเหตุการณ์วันที่ 3 เดือนกันยายน พ.ศ. 2551 ซึ่งเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในนาทิตี่ 20 และเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในนาทิตี่ 60 (ภาพที่ 22) loop มีแกนสั้นที่สุด ส่วนปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย ที่มี loop แกนกว้างมากที่สุด ได้แก่



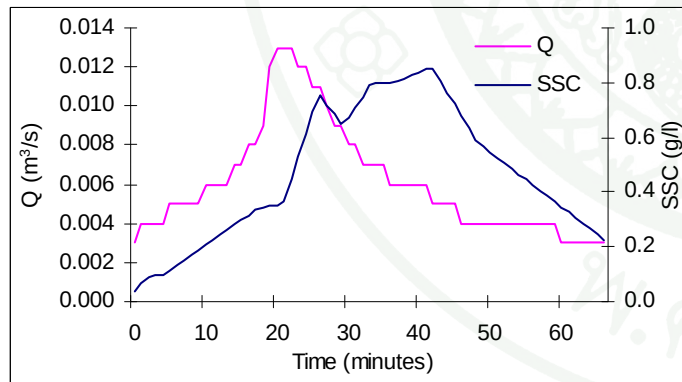


(a) Temporal graph

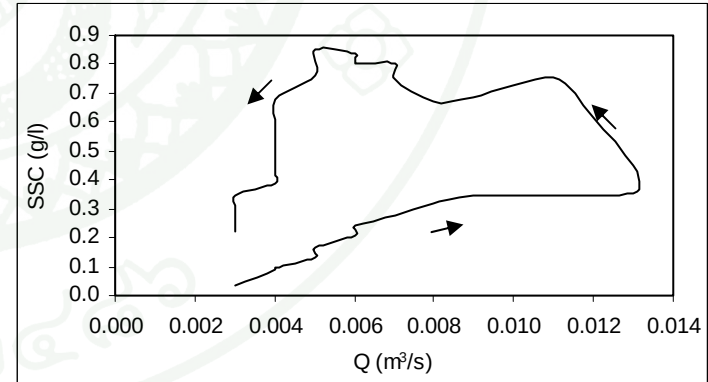


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 18 รูปแบบวงรอบหมุนวนเจ็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2550

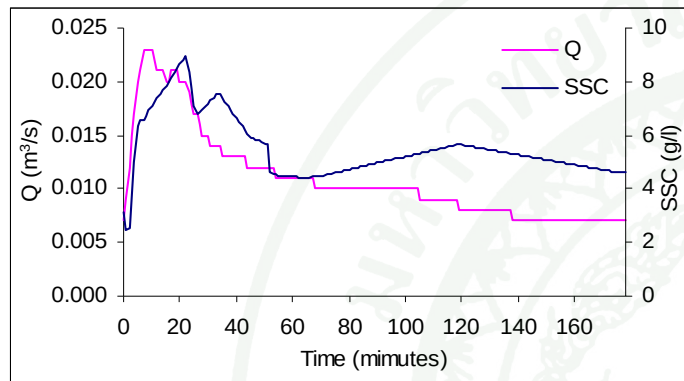


(a) Temporal graph

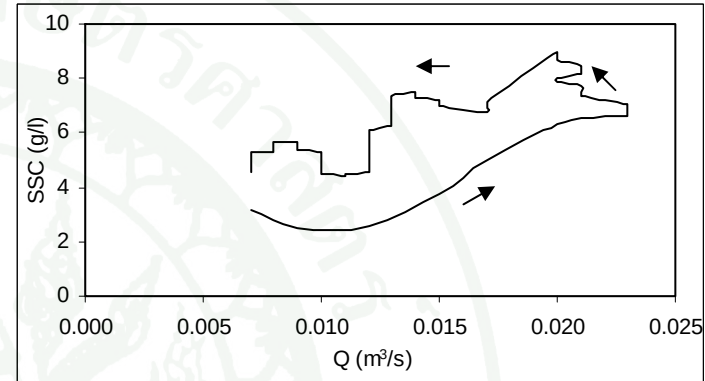


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 19 รูปแบบวงรอบหมุนวนเจ็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2550

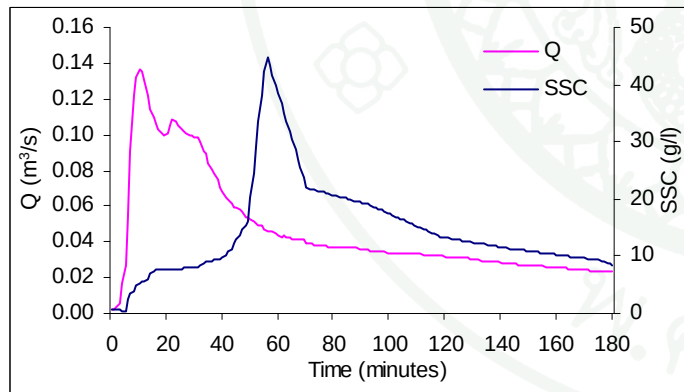


(a) Temporal graph

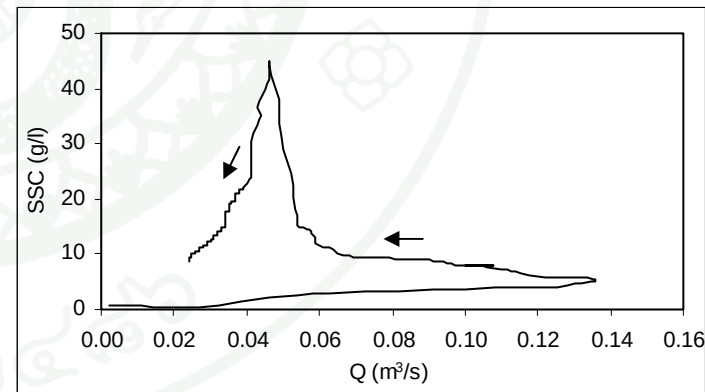


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 20 รูปแบบวงรอบหมุนวนเข้มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2551

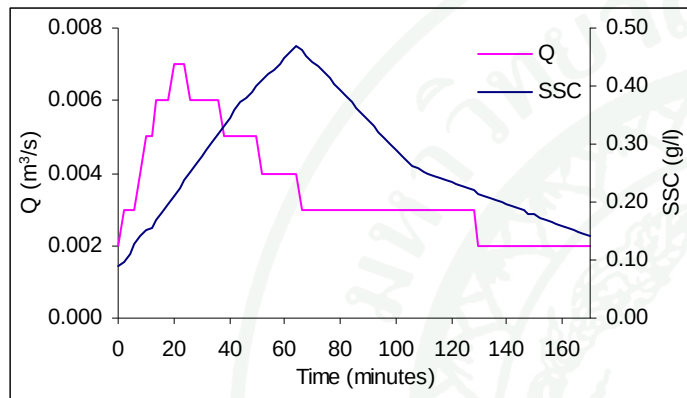


(a) Temporal graph

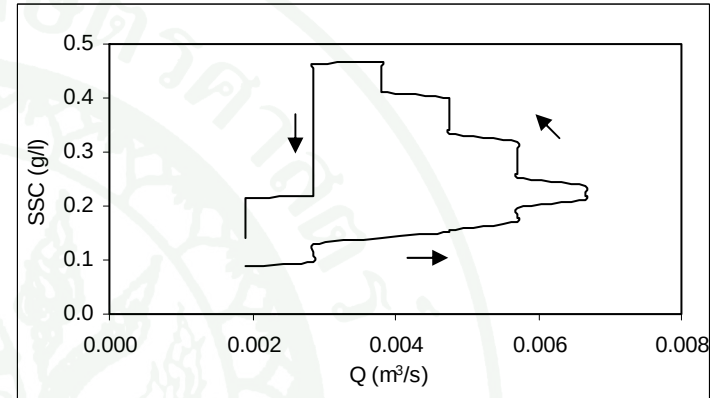


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 21 รูปแบบวงรอบหมุนวนเข้มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2551

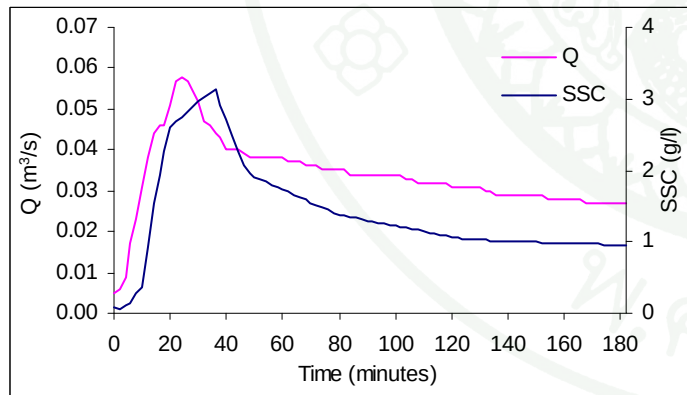


(a) Temporal graph

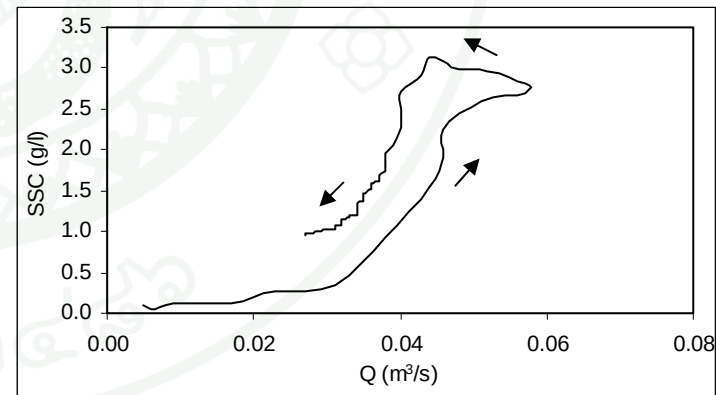


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 22 รูปแบบวงรอบหมุนวนเข้มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2551



(a) Temporal graph



(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 23 รูปแบบวงรอบหมุนวนเข้มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2551

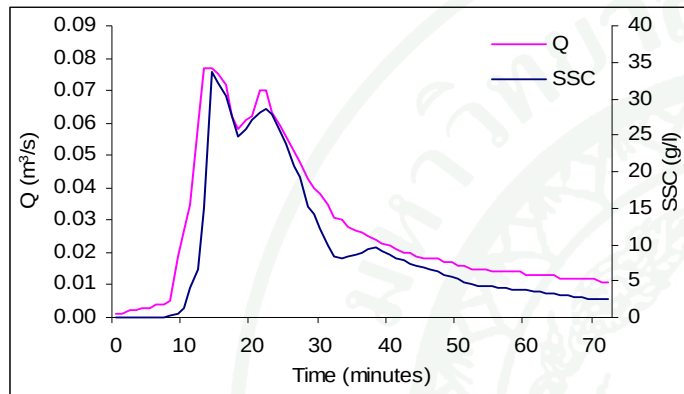
เหตุการณ์วันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2551 เนื่องจากมีจุดสูงสุดของกราฟน้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยระยะเวลาเกิดห่างกัน 45 นาที และปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยที่มี loop ที่แคบที่สุดคือเหตุการณ์วันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2551 เวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในนาที่ที่ 24 และเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในนาที่ที่ 36 (ภาพที่ 23) มีระยะห่างกันของจุดสูงสุดทั้ง 2 กราฟ เพียง 12 นาที

### 2.3 วงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด (figure-eight loop)

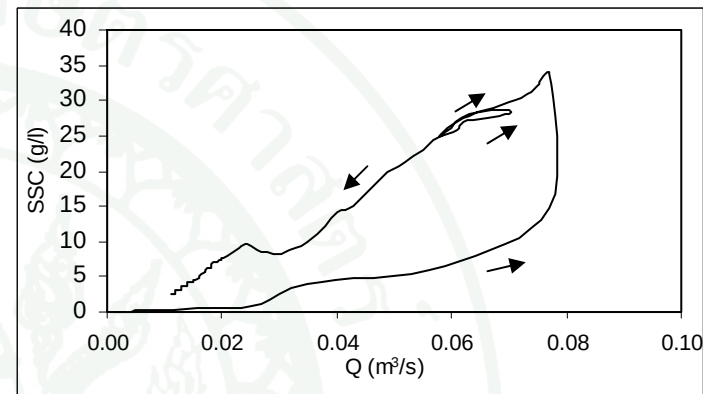
จากการศึกษาพบว่า รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงเป็นตัวเลขแปดมีทั้งหมด 7 เหตุการณ์เป็นความสัมพันธ์ที่มีความต่อเนื่องกันระหว่างความสัมพันธ์รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา กับรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Williams, 1989) แต่โดยปกติแล้วส่วนใหญ่ไม่คำนึงว่าจุดสูงสุดของน้ำท่าหรือความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยอันไหนมาก่อนกันเพียงแต่ทั้งสองรูปแบบเป็น loop ย่อยของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดเท่านั้น รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดมีลักษณะการแผ่ของกราฟความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยกับกราฟน้ำท่าที่เหมือนกัน แต่การเบนเอียงนั้นผันแปร ส่วนค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนขึ้นมากกว่าช่วงส่วนลดในบางช่วงระดับค่าของกราฟน้ำท่าเท่านั้น และช่วงระดับค่าอื่น ๆ มีค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนขึ้นน้อยกว่าช่วงส่วนลดดังตัวอย่างต่อไปนี้

วงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดที่มีรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกาเกิดก่อนแล้วค่อยเปลี่ยนเป็นวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาดังภาพที่ 24 ถึงภาพที่ 28 ที่มีค่า SSC/Q ratio ส่วนแรกเริ่มของกราฟน้ำท่าในช่วงส่วนขึ้นน้อยกว่าค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนลดซึ่งเป็นการสัมพันธ์ในรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา และในทางตรงกันข้ามในส่วนตอนบนของกราฟน้ำท่าจะมีค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนขึ้นมากกว่าค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนลดซึ่งเป็นการสัมพันธ์ในรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา

ส่วนวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดที่มีรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาเกิดก่อนแล้วค่อยเปลี่ยนเป็นรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกาดังภาพที่ 29 และภาพที่ 30 มีค่า SSC/Q ratio ส่วนแรกเริ่มของกราฟน้ำท่าในช่วงส่วนขึ้นมากกว่าค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนลด ซึ่งเป็นการสัมพันธ์ในรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา และในทางตรงกันข้ามในส่วนตอนบนของกราฟน้ำท่ามีค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนขึ้นน้อยกว่าค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนลดซึ่งเป็นการสัมพันธ์ในรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา

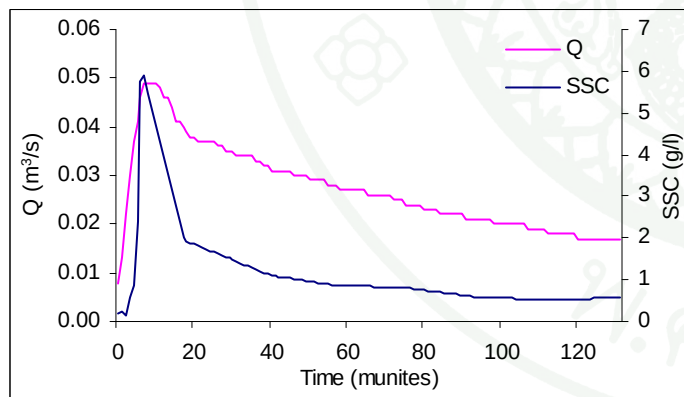


(a) Temporal graph

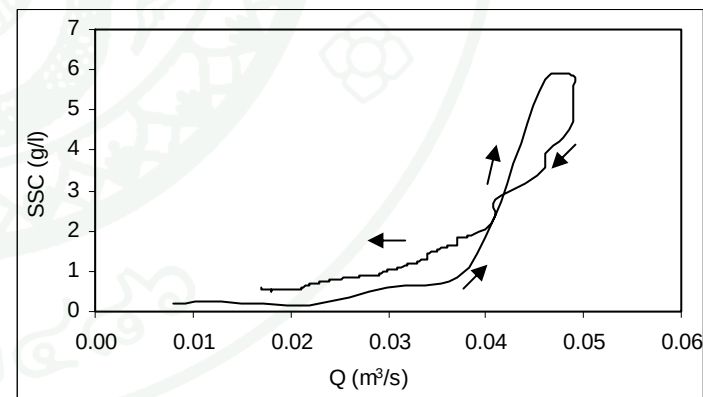


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 24 รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 27 มิถุนายน พ.ศ. 2550



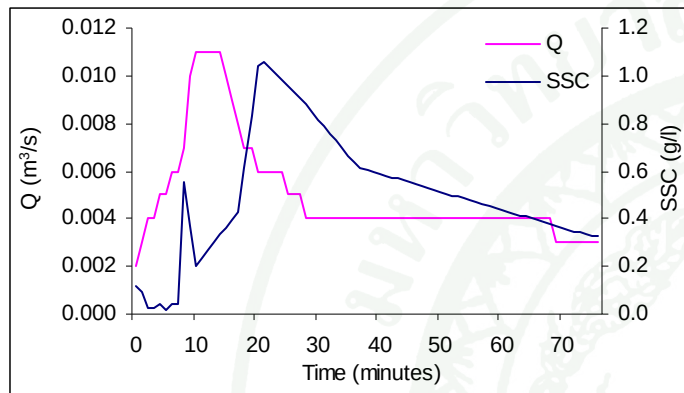
(a) Temporal graph



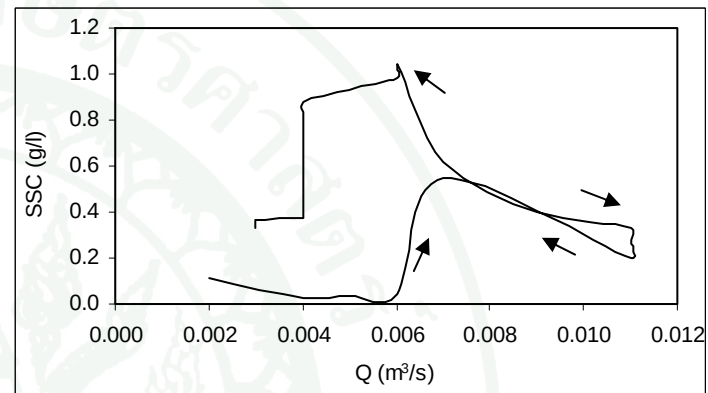
(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 25 รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 20 กันยายน พ.ศ. 2550



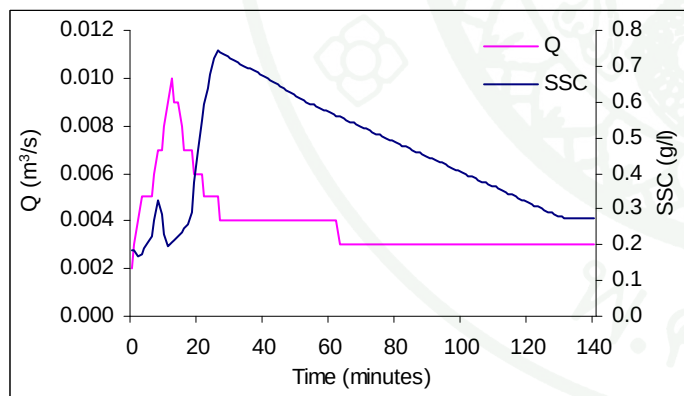


(a) Temporal graph

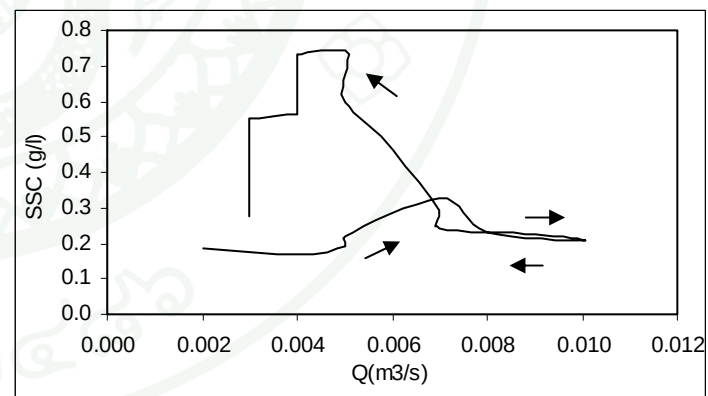


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 26 รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหามาโน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2551

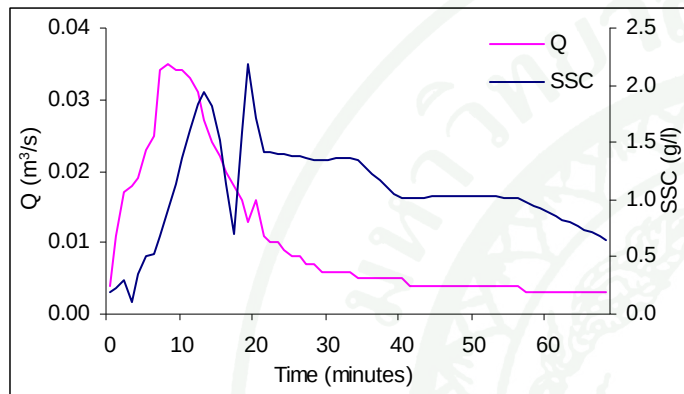


(a) Temporal graph

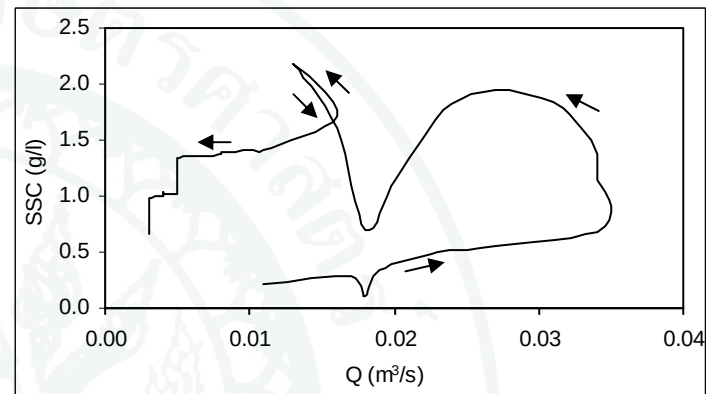


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 27 รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหามาโน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2551

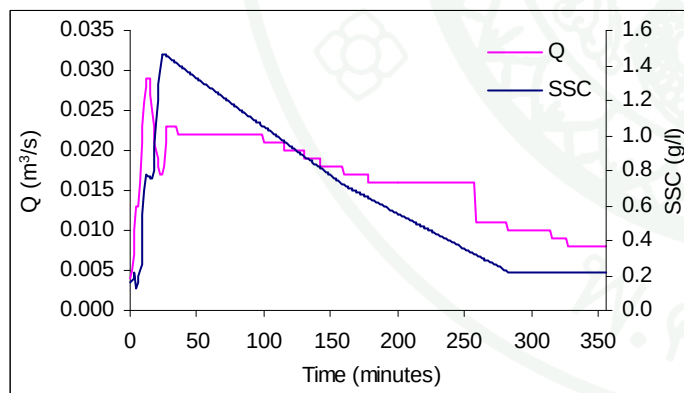


(a) Temporal graph

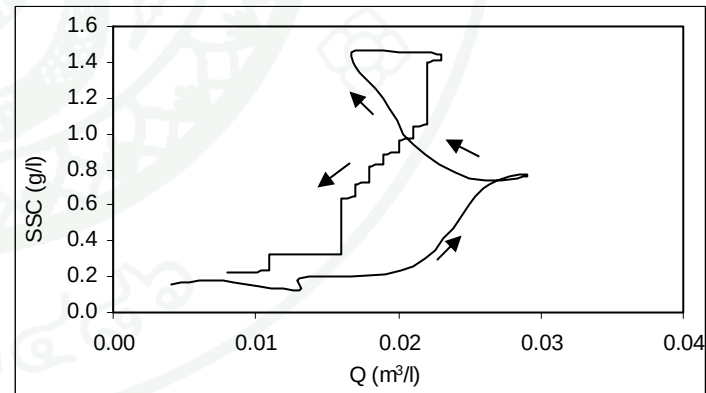


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 28 รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2551

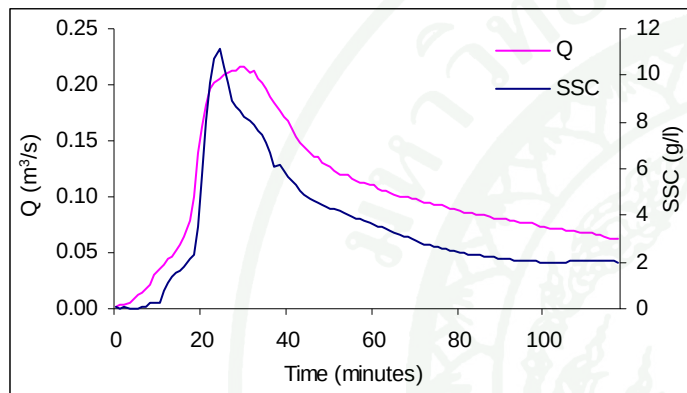


(a) Temporal graph

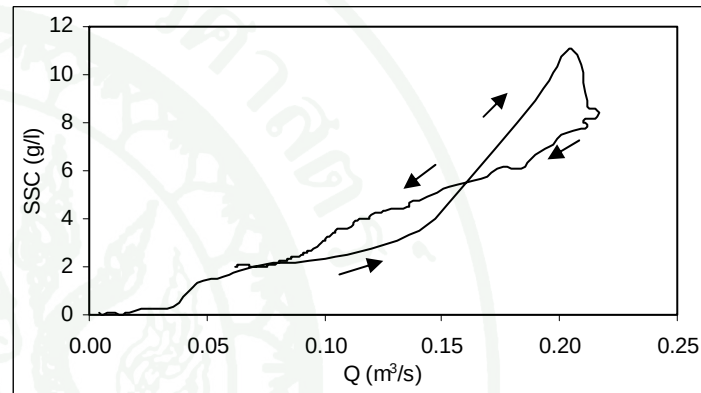


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 29 รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2551



(a) Temporal graph



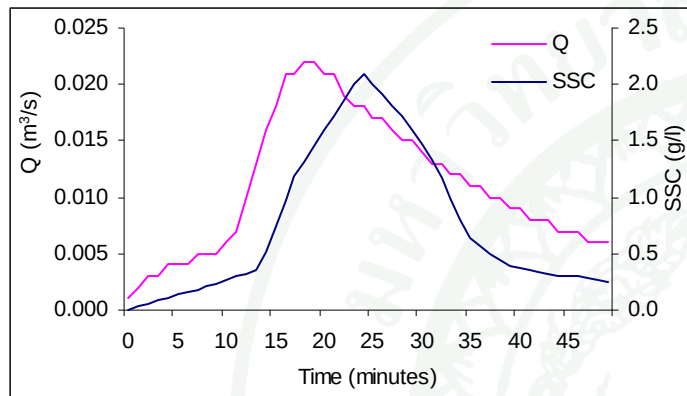
(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 30 รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2551

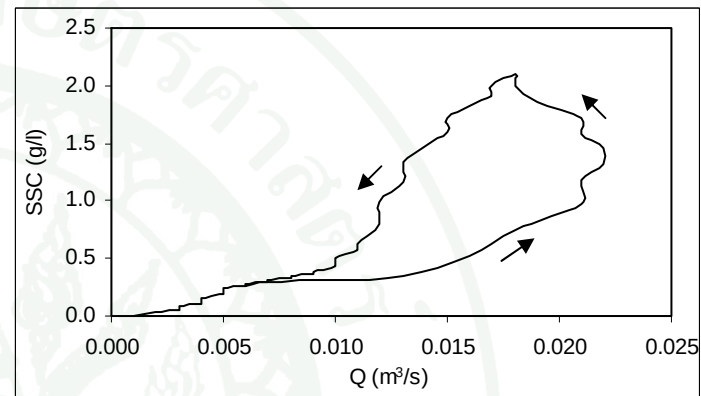
## 2.4 รูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ (single line plus a loop)

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบเกิดขึ้น 3 เหตุการณ์ เป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่เกิดร่วมกันระหว่างรูปแบบเส้นเดียวตรงกับวงรอบหมุนวนเข้มนาฬิกา โดยเกิดเส้นเดียวตรงซึ่งจะมีค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนขึ้นเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากกับค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนลดในช่วงแรกและช่วงสุดท้ายของกราฟน้ำท่า จึงทำให้ loop นั้นมาประชิดกัน และ loop ช่วงตอนกลางของกราฟน้ำท่ามีจุดสูงสุดของน้ำท่าเกิดขึ้นก่อนจุดสูงสุดของความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย และมีค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนขึ้นน้อยกว่าค่า SSC/Q ratio ในช่วงส่วนลดโดยเป็นรูปแบบวงรอบหมุนวนเข้มนาฬิกาทั้ง 3 เหตุการณ์

เหตุการณ์ วันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2550 เวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในนาที่ที่ 18 และเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในนาที่ที่ 23 :ซึ่ง loop นั้นมาประชิดกันในนาที่ที่ 42 ดังภาพที่ 31 ส่วนเหตุการณ์วันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2550 เวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในนาที่ที่ 5 และเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในนาที่ที่ 16 :ซึ่ง loop นั้นมาประชิดกันในนาที่ที่ 74 ดังภาพที่ 32 และเหตุการณ์วันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2551 เวลาที่เกิดจุดสูงสุดของน้ำท่าในนาที่ที่ 16 และเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในนาที่ที่ 20 :ซึ่ง loop นั้นมาประชิดกันในนาที่ที่ 40 ดังภาพที่ 33

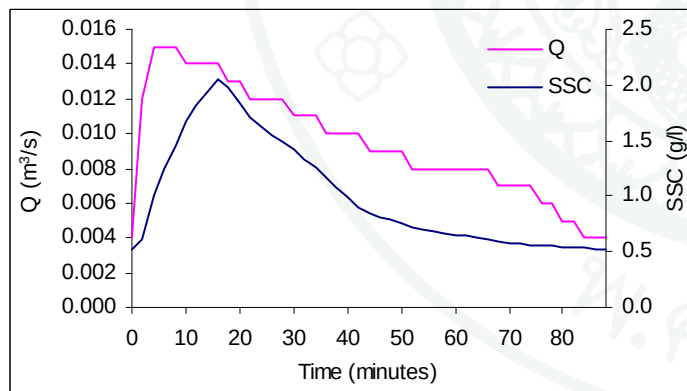


(a) Temporal graph

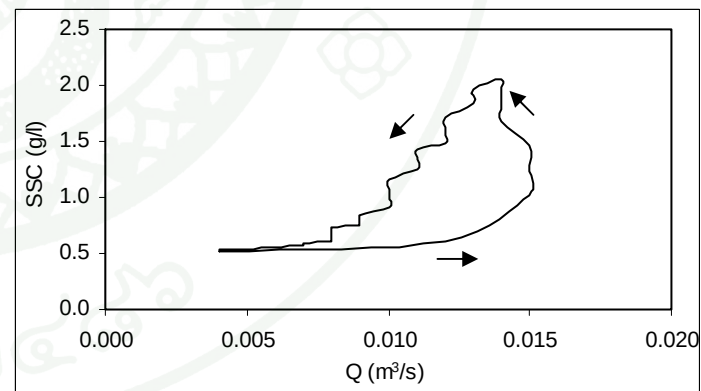


(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 31 รูปแบบเส้นเคียวตามตัววงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2550



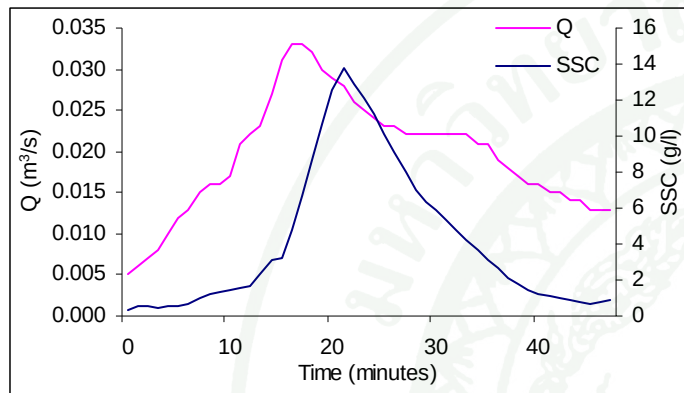
(a) Temporal graph



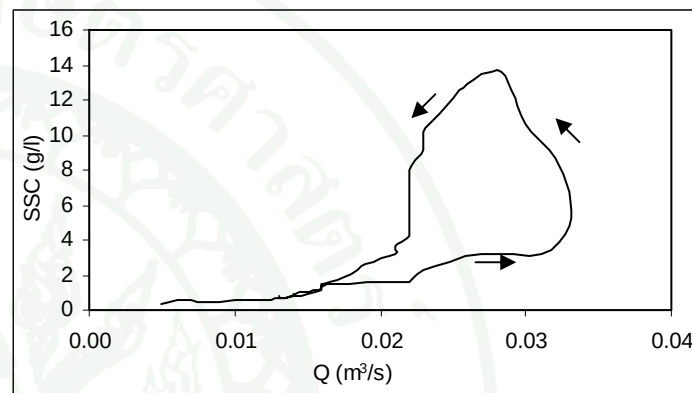
(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 32 รูปแบบเส้นเคียวตามตัววงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2550





(a) Temporal graph



(b) SSC-Q relation

ภาพที่ 33 รูปแบบเส้นเคียวตามด้วยวงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2551

### 3. ปัจจัยที่มีต่อรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอย (hysteresis loops)

ผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในแต่ละครั้งที่ฝนตกที่แสดงออกมาในรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยทั้ง 4 รูปแบบ นั้นปัจจัยที่ได้ศึกษา และมีผลต่อรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยที่แตกต่างกันมีด้วยกัน 4 ปัจจัยใหญ่ คือ สภาพฝน ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน ความหนักเบาของฝน ช่วงระยะเวลาที่ฝนตก ด้านน้ำท่า ได้แก่ ปริมาณน้ำท่า ตะกอนแขวนลอย และช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ดังตารางที่ 4 อธิบายได้ดังนี้

#### 3.1 สภาพฝน

ฝนที่ตกในพื้นที่ลุ่มน้ำมีอิทธิพลโดยตรงต่อน้ำที่เกิดในลำธาร และการเกิดตะกอนได้แก่

1) ปริมาณฝน (rainfall amount) ปริมาณฝนที่ลงมายังพื้นดินบางครั้งไม่ได้แทรกซึมลงไปดินทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการแทรกซึม (infiltration rate) ถ้าปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาในอัตราน้อยกว่าการแทรกซึม น้ำฝนจะแทรกซึมลงดินทั้งหมด แต่ถ้าปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาในอัตราที่มากกว่าอัตราแทรกซึม น้ำฝนที่เหลือจากการแทรกซึมลงดินก็จะเกิดการไหลบ่าผ่านผิวดิน (surface runoff) และตะกอนลงสู่ที่ต่ำ กรณีที่มีพืชพรรณหรือป่าไม้ขึ้นปกคลุมพื้นดิน ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาบางส่วนจะถูกยึดไว้ (interception) โดยใบ กิ่ง ก้าน และลำต้น จะมีมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชพรรณหรือประเภทของป่าไม้ ถึงแม้ว่าปริมาณน้ำฝนที่ตกจะแทรกซึมลงดินทั้งหมดหรือเป็นบางส่วนก็ตาม ดินก็ได้รับความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้ดินมีน้ำหนักรวมเพิ่มขึ้น จึงมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลดินด้วยกันหรือระหว่างมวลดินลดลง ขณะเดียวกันแรงต้านต่อการยึดเหนี่ยวหรือแรงผลักดันมีเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับสภาพพื้นที่ตามลาดไหล่เขาที่มีความลาดชัน และมีแรงโน้มถ่วงของโลก จึงเป็นสาเหตุให้ดินแตกหลุดออกจากกัน และเกิดการถล่มลงมาพร้อมกับการไหลบ่าของน้ำก็ได้

จากการศึกษาปริมาณฝนที่ตกในแต่ละรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอยโดยใช้เกณฑ์ปริมาณน้ำฝนของกรมอุตุนิยมวิทยา (2547) พบว่า รูปแบบรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา และรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด มีปริมาณฝนตั้งแต่ร้อยละปานกลาง ส่วนรูปแบบ วงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา และรูปแบบเส้นเคียวตามด้วยวงรอบจะมีปริมาณฝนปานกลาง ดังตารางที่ 5

**ตารางที่ 4** ปริมาณน้ำฝน ความหนักเบาของฝน ระยะเวลาที่ฝนตก และช่วงเวลาห่างจุดสูงสุดของน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยในรูปแบบ ต่าง ๆ

| รูปแบบปรากฏการณ์<br>ไม่ซ้ำรอย | R<br>(mm) | IP<br>(mm/hr) | ระยะ เวลา<br>ที่ฝนตก<br>(min) | ช่วงเวลาห่างจุดสูงสุดของ<br>น้ำท่ากับความเข้มข้น<br>ตะกอนแขวนลอย<br>(min) |
|-------------------------------|-----------|---------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| clockwise                     |           |               |                               |                                                                           |
| 1/9/2550                      | 12.5      | 60            | 24                            | พร้อมกัน                                                                  |
| 14/9/2551                     | 8.0       | 30            | 30                            | 1                                                                         |
| counter-clockwise             |           |               |                               |                                                                           |
| 15/9/2550                     | 18.0      | 70            | 30                            | 6                                                                         |
| 19/9/2550                     | 14.5      | 65            | 30                            | 20                                                                        |
| 14/7/2551                     | 33.5      | 90            | 240                           | 14                                                                        |
| 22/7/2551                     | 23.0      | 70            | 67                            | 45                                                                        |
| 3/9/2551                      | 5.5       | 30            | 180                           | 40                                                                        |
| 7/9/2551                      | 17.0      | 35            | 156                           | 12                                                                        |
| figure-eight                  |           |               |                               |                                                                           |
| 27/6/2550                     | 14.0      | 75            | 72                            | 1                                                                         |
| 20/9/2550                     | 8.5       | 30            | 30                            | พร้อมกัน                                                                  |
| 25/7/2551                     | 5.0       | 25            | 270                           | 10                                                                        |
| 26/7/2551                     | 3.5       | 5             | 12                            | 13                                                                        |
| 2/9/2551                      | 20.0      | 90            | 45                            | 10                                                                        |
| 6/9/2551                      | 24.0      | 60            | 300                           | 11                                                                        |
| 10/9/2551                     | 34.0      | 90            | 84                            | 3                                                                         |
| single line plus              |           |               |                               |                                                                           |
| 29/8/2550                     | 13.5      | 40            | 24                            | 5                                                                         |
| 30/8/2550                     | 28.5      | 60            | 30                            | 11                                                                        |
| 2/8/2551                      | 12.0      | 60            | 24                            | 4                                                                         |

หมายเหตุ - : R = ปริมาณน้ำฝน (mm)

IP = ความหนักเบา (mm/hr)

ตารางที่ 5 รูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยในแต่ละลักษณะฝน และความหนักเบาของฝน

| ลักษณะของฝน                | รูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย (ครั้ง) |                       |                  |                      |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------|----------------------|
| ปริมาณฝน (มม.)             |                                   |                       |                  |                      |
| ฝนเล็กน้อย                 | clockwise (1)                     | counter-clockwise (1) | figure-eight (3) | -                    |
| ฝนปานกลาง                  | clockwise (1)                     | counter-clockwise (5) | figure-eight (4) | single line plus (3) |
| ฝนหนัก                     | -                                 | -                     | -                | -                    |
| ฝนหนักมาก                  | -                                 | -                     | -                | -                    |
| ความหนักเบาของฝน (มม./ชม.) |                                   |                       |                  |                      |
| เบา                        | -                                 | -                     | figure-eight (1) | -                    |
| ปานกลาง                    | -                                 | -                     | figure-eight (1) | -                    |
| หนัก                       | clockwise (1)                     | counter-clockwise (2) | figure-eight (5) | single line plus (1) |
| หนักมาก                    | clockwise (1)                     | counter-clockwise (4) | -                | single line plus (2) |

หมายเหตุ - : ไม่พบรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอย

2) ความหนักเบาของฝน (rainfall intensity) ความเข้มของฝนตกเมื่อมากกว่าอัตราการซึมของน้ำที่ไหลลงไปดินแล้ว ปริมาณน้ำท่าที่ไหลบนผิวดินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอัตราการเพิ่มของฝนที่ตกอย่างไรก็ตามปริมาณน้ำท่าที่ไหลบนผิวดินอาจไม่เพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนน้ำฝนที่เหลือจากการซึมสูญหายลงไปดินเท่าใดนัก ทั้งนี้เพราะฝนที่เหลือดังกล่าวส่วนหนึ่งมักถูกเก็บขังในลักษณะน้ำนองในที่ลุ่มก่อนที่จะไหลหลากเป็นน้ำท่า ซึ่งความหนักเบาของฝนที่แตกต่างก็มีผลต่อรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยที่แตกต่างกันไป จากการศึกษพบว่า ความหนักเบาของฝนที่ฝนตกเบาถึงหนักมากมีรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยเพียงรูปแบบเดียวคือรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา ส่วนรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดมีความหนักเบาของฝนหนัก และความหนักเบาของฝนที่หนักมากเกิดขึ้นใน รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา และรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ (ตารางที่ 5)

3) ระยะเวลาที่ฝนตก (rainfall duration) ในพื้นที่ลุ่มน้ำมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดน้ำท่าเป็นจำนวนมากหรือน้อยเพียงใด เมื่อฝนตกครั้งหนึ่ง ๆ ระยะเวลาที่ฝนตกนี้ยังมีส่วนเกี่ยวข้องต่อการลดอัตราการไหลซึมของน้ำลงไปดินด้วย ดังนั้นแม้ว่าอัตราความเข้มของฝนที่ตกในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่ถ้าฝนตกเป็นเวลานานแล้วก็จะก่อให้เกิดน้ำท่าในลำธารลำห้วย และส่งผลต่อการเกิดรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ระยะเวลาที่ฝนตกไม่เกิน 30 นาที จะเกิดรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยได้แก่ รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา

นาฬิกา และรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ ส่วนระยะเวลาที่ฝนตกยาวนานตั้งแต่ 30 นาทีขึ้นไป เกิดรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา และรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด

### 3.2 น้ำท่า (runoff)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ในรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย ซึ่งความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของการเคลื่อนที่ของน้ำท่ากับตะกอนแขวนลอย และปริมาณของน้ำท่ากับตะกอนแขวนลอยที่มาถึงจุดตรวจวัด รวมถึงพิจารณาเกี่ยวกับเวลาในการเคลื่อนที่ (travel time) หรือ อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ ซึ่งมีผลต่อการเกิดรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยที่แตกต่างกันออกไป จากการศึกษาพบว่า รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกามีปริมาณน้ำท่าตั้งแต่ปริมาณน้อยถึงปานกลาง ส่วนรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยที่มีปริมาณน้ำทาน้อยพบ 3 รูปแบบ คือรูปแบบวงรอบรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด และรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ รายละเอียดตามตารางที่ 6

### 3.3 ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (suspended sediment concentration)

ส่วนความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยพบว่า ทั้ง 4 รูปแบบส่วนใหญ่แล้วจะมีความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยอยู่ในระดับน้อยเมื่อพิจารณาจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบแล้ว ดังรายละเอียดในตารางที่ 6

## 4. รูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

สำหรับการศึกษาในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ ซึ่งส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นภูเขา ซึ่งปัจจุบันมีการบุกรุกพื้นที่ป่า และพื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 1A เพื่อใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการเกษตรโดยการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นหลักเกือบทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้จะอธิบายรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยที่เกิดขึ้นในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ดังตารางที่ 7 และภาพที่ 34



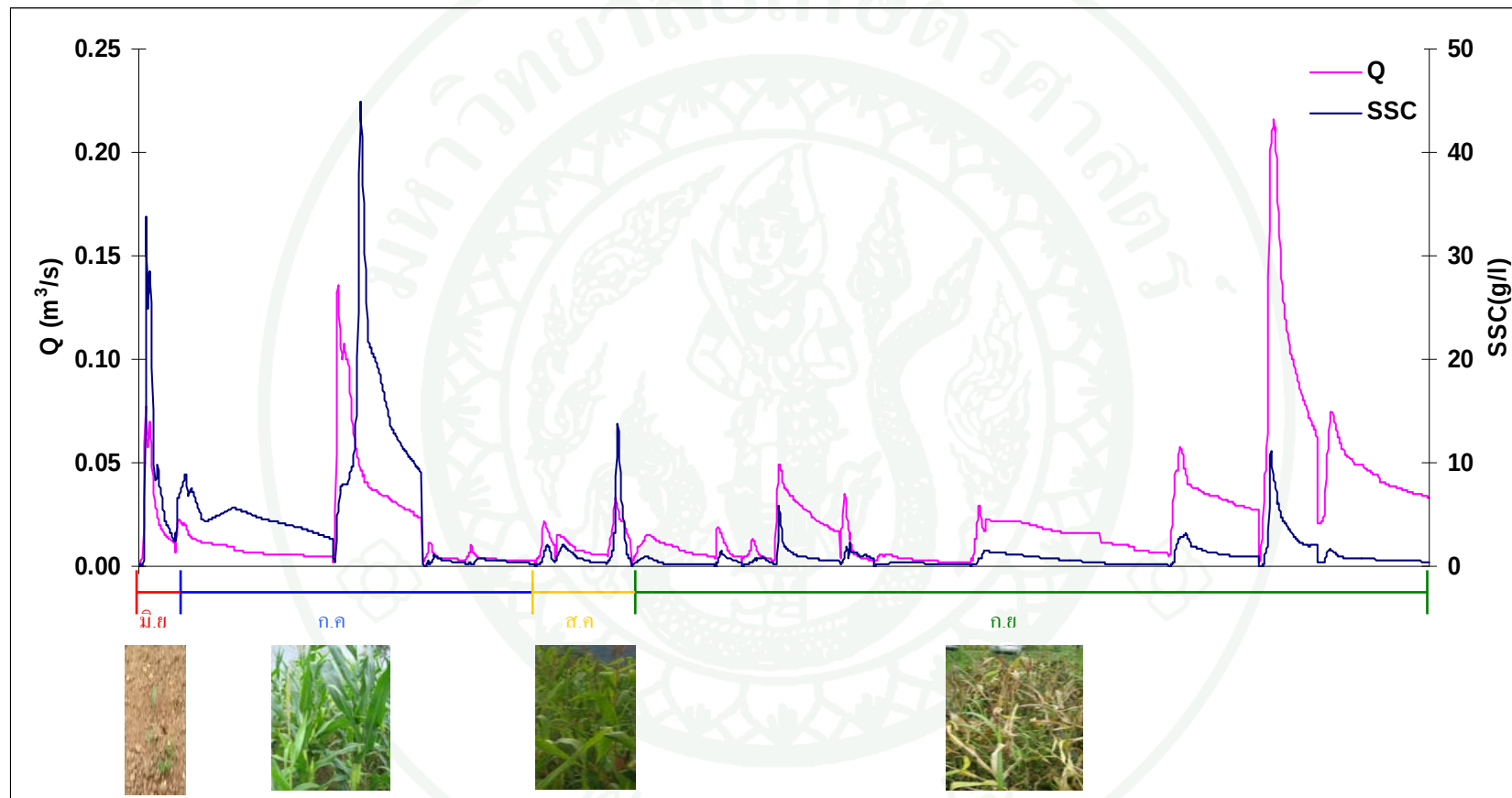
ตารางที่ 6 รูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยในแต่ละช่วงปริมาณน้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย

| ปริมาณน้ำท่า/ตะกอนแขวนลอย           |               | รูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย (ครั้ง) |                  |                      |
|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------|------------------|----------------------|
| ปริมาณน้ำท่า (ลบ.ม/วินาที)          |               |                                   |                  |                      |
| น้อย                                | clockwise (1) | counter-clockwise (4)             | figure-eight (6) | single line plus (3) |
| ปานกลาง                             | clockwise (1) | counter-clockwise (2)             | -                | -                    |
| มาก                                 | -             | -                                 | figure-eight (1) | -                    |
| ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (กรัม/ลิตร) |               |                                   |                  |                      |
| น้อย                                | clockwise (2) | counter-clockwise (4)             | figure-eight (5) | single line plus (2) |
| ปานกลาง                             | -             | counter-clockwise (2)             | figure-eight (1) | single line plus (1) |
| มาก                                 | -             | -                                 | figure-eight (1) | -                    |

หมายเหตุ - : ไม่พบรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย

ตารางที่ 7 รูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยในแต่ละช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

| ระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ | ช่วงเดือนที่เกิด | ปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย     |                   |
|-----------------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------|
|                                         |                  | รูปแบบ                  | จำนวนครั้งที่เกิด |
| ทางลำต้นและใบ                           | มิถุนายน         | figure-eight            | 1                 |
| ออกดอก                                  | กรกฎาคม          | counter-clockwise       | 2                 |
|                                         | กรกฎาคม          | figure-eight            | 2                 |
| สะสมน้ำหนักเมล็ด                        | สิงหาคม          | single line plus a loop | 3                 |
| สุกแก่และเก็บเกี่ยว                     | กันยายน          | clockwise               | 2                 |
|                                         | กันยายน          | counter-clockwise       | 4                 |
|                                         | กันยายน          | figure-eight            | 4                 |



ภาพที่ 34 ปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

#### 4.1 ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบ (vegetative stage)

ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ก่อนปลูกพืชเกษตรกรได้ทำการไถพรวนดิน และทำการปลูกพืชที่มีระยะการปลูกเท่ากับ 30x45 เซนติเมตร เป็นระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบ เจริญเติบโตจนถึงระยะที่ช่อดอกโผล่พ้นใบธง ใช้เวลา 45-55 วัน ซึ่งเป็นช่วงเดือนมิถุนายน ในช่วงนี้มีรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยเป็นรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดเพียงรูปแบบเดียว พบว่า มีตะกอนแขวนลอยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะเป็นช่วงที่มีการเตรียมพื้นที่เพื่อจะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยมีการไถพรวนดิน และเป็นช่วงที่ต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กำลังงอกเป็นต้นอ่อน ใบสามารถปกคลุมดินได้ค่อนข้างต่ำจึงทำให้เกิดการชะล้างพังทลายดินอย่างรุนแรงมากกว่าช่วงการเจริญเติบโตของต้นข้าวโพดระยะอื่น ๆ

#### 4.2 ระยะออกดอก (flowering stage)

ระยะตั้งแต่ดอกตัวผู้บานจนถึงระยะไหมโผล่พ้นกาบหุ้มฝักรวมทั้งระยะการผสมเกสรด้วย รวมเวลา 5-15 วัน ต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กำลังเจริญเติบโตทางลำต้น และใบมีปริมาณมากขึ้นสามารถปกคลุมดินได้ปานกลาง ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงเดือนกรกฎาคม พบว่า ในช่วงนี้มีรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอย 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา และรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ทั้งสองรูปแบบเกิดขึ้นอย่างละ 2 เหตุการณ์

#### 4.3 ระยะสะสมน้ำหนักเมล็ด (grain filling stage)

ระยะที่มีการสะสมแป้งในเมล็ด เริ่มตั้งแต่ระยะน้ำนม (early milk และ late milk stage) และระยะแป้งอ่อน (dough stage) จนถึงระยะที่เมล็ดสิ้นสุดการพัฒนา รวมเวลาทั้งสิ้นประมาณ 35-45 วัน ซึ่งต้นข้าวโพดเป็นระยะที่ต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เจริญเติบโตเต็มที่ ฝักโตเต็มที่เมล็ดเจริญเต็มที่ ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การปกคลุมดินสูง ระยะนี้อยู่ช่วงเดือนสิงหาคม ซึ่งพบว่า ในระยะการเจริญเติบโตนี้มีรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยเพียงรูปแบบเดียว คือ รูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบเกิดขึ้น 3 เหตุการณ์

#### 4.4 ระยะสุกแก่และเก็บเกี่ยว (maturity harvesting stage)

ระยะที่ต้นใบ และกาบหุ้มฝักแห้ง ข้าวโพดมีอายุประมาณ 90-120 วัน นับจากหลังปลูก โดยข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีความสูงเฉลี่ยประมาณ 187 เซนติเมตร และในช่วงนี้มีหญ้าขึ้นปกคลุมดินมากทำให้มีเปอร์เซ็นต์การปกคลุมดินสูงซึ่งอยู่ในช่วงเดือนกันยายนพบว่า รูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอย 3 รูปแบบ ได้แก่รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา เกิดขึ้น 2 เหตุการณ์ รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกาเกิดขึ้น 4 เหตุการณ์ และรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดเกิดขึ้น 4 เหตุการณ์ ทั้งนี้เนื่องจากเดือนนี้มีการเก็บเกี่ยวบ้างแล้ว จึงทำให้เกิดรูปแบบที่หลากหลาย โดยรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาเกิดขึ้นได้เนื่องจากบางพื้นที่ยังมีการเก็บเกี่ยวจึงทำให้เกิดน้ำไหลบ่าและการชะล้างพังทลายของดินได้ หรือพื้นที่ที่มีการเก็บเกี่ยวอยู่ใกล้กับสถานีตรวจวัดจึงทำให้ตะกอนเคลื่อนที่เพียงระยะเวลานั้น ๆ ส่วนพื้นที่ที่ยังไม่มีการเก็บเกี่ยวสามารถเกิดรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา และรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดสามารถเกิดขึ้นทั้งในพื้นที่ที่มีการเก็บเกี่ยว และยังไม่มีการเก็บเกี่ยว

### 5. หลักการ และเหตุผลทางด้านปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยในแต่ละรูปแบบ

#### 5.1 รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา (clockwise loop)

เหตุผลของการเกิดลักษณะความสัมพันธ์รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา ซึ่งมีตะกอนเกิดการสูญเสียหรือมีจุดสูงสุดเกิดขึ้นก่อนจุดสูงสุดของน้ำทำเป็นตัวชี้ให้เห็นว่ามีการชะล้างดิน และการเคลื่อนที่ของตะกอนที่รวดเร็วในลำธาร ทั้งนี้เนื่องจาก

1) เกิดการไหลทะลักของตะกอนค่อนข้างเร็วจากการเกิดน้ำไหลบ่า และน้ำไหลบ่าเกิดการไหลที่ยาวนาน (Wood, 1977)

2) โดยหลักการรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาแล้ว Heidel (1956) กล่าวว่าไว้ว่าจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยโดยปกติแล้วจะเกิดก่อนจุดสูงสุดของน้ำทำถ้าลำธารนั้นมีขนาดเล็ก กลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโนเป็นกลุ่มน้ำขนาดเล็ก ดังนั้นการที่มีเหตุการณ์ความสัมพันธ์ในรูปแบบนี้ก็จะเป็นสิ่งที่เป็นไปได้

3) บางครั้งมีการสะสมของตะกอนในท้องลำธาร เนื่องจากลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไนมีตะกอนปริมาณมากที่ไหลมาตกค้างก่อนถึงจุดตรวจวัด

4) จากการศึกษาปัจจัยทั้งด้านน้ำฝน น้ำท่า ตะกอนแขวนลอย และระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พบว่า รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนน้อยถึงปานกลาง มีความหนักเบาของฝนที่ระดับเบาถึงหนักมาก และระยะเวลาที่ฝนตกเท่ากับหรือน้อยกว่า 30 นาที ส่วนปริมาณน้ำท่าที่มีปริมาณน้อยถึงปานกลาง ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยอยู่ในระดับน้อย และจะเห็นได้ว่ารูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาจะเกิดขึ้นในช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในระยะสุกแก่ และเก็บเกี่ยวเพียงระยะเดียวทั้งนี้เนื่องจากช่วงระยะนี้มีการเก็บเกี่ยวจึงอาจทำให้แหล่งของการเกิดตะกอนนั้นใกล้กับจุดตรวจวัดส่งผลต่อเวลาในการเคลื่อนของตะกอนมาถึงจุดวัดในเวลาอันสั้น

## 5.2 รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา (counter-clockwise loop)

ลักษณะความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ไม่ซ้ำรอยรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่มีจุดสูงสุดของน้ำท่าเกิดขึ้นก่อนจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอน โดยเป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นทั่วไปซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลได้ คือ

1) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาของการเคลื่อนที่การไหลของน้ำท่ากับการไหลของตะกอน โดยเฉพาะระยะทางระหว่างแหล่งที่เกิดน้ำไหลป่าถึงจุดตรวจวัด (Heidel, 1956) ซึ่งเป็นไปได้ที่พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไนมีแหล่งของการเกิดตะกอนนั้นอยู่ใกล้กับจุดตรวจวัดจึงทำให้ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ยาวนานหลังจากที่น้ำไหลป่าไหลมาถึงจุดตรวจวัดแล้ว

2) ปกติแล้วความเร็วของกระแสน้ำจะไหลเร็วกว่าความเร็วของกระแสน้ำเฉลี่ย ซึ่งแนวโน้มของอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยมักเกิดขึ้นใกล้กับความเร็วของกระแสน้ำเฉลี่ย ดังนั้นการไหลของตะกอนแขวนลอยจึงมาช้ากว่าการไหลของน้ำในช่วงเวลาที่มากขึ้นตามระยะทางการไหลถึงจุดตรวจวัดและเกิดการสกัดกั้นการเคลื่อนที่ของตะกอนกับน้ำท่าในลำธาร แต่ตะกอนจะถูกสกัดกั้นมากกว่าการไหลของน้ำ การเกิดจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยมาถึงสถานีตรวจวัดที่เกิดขึ้นช้าเป็นการเพิ่มปริมาณตะกอนในลำธาร ซึ่งลำธารเองมีความสามารถในการบรรจุปริมาณน้ำท่ากับตะกอนไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงเกิดการสกัดกั้นการเคลื่อนที่ของ



ตะกอนกับน้ำท่า แต่ตะกอนจะถูกสกัดกั้นมากกว่าการไหลของน้ำ เช่นเดียวกับที่ Axelsson (1967) ได้ศึกษาในแม่น้ำราฟาลเวน (Rapaalven river) ในตอนเหนือของประเทศสวีเดน พบว่าจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยเกิดขึ้นกว่าจะถึงสถานีตรวจวัดหลายวัน

3) เมื่อพิจารณาทางด้านปัจจัยทั้งด้านน้ำฝน น้ำท่า ตะกอนแขวนลอย และระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พบว่า รูปแบบวงรอบหมุนวนเข็มนาฬิกาจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนปานกลาง มีความหนักเบาของฝนที่ระดับหนักมากเป็นส่วนใหญ่ และระยะเวลาที่ฝนตกมากกว่า 30 นาที ส่วนปริมาณน้ำท่าและความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยอยู่ที่ระดับน้อย และจะเห็นว่ารูปแบบวงรอบหมุนวนเข็มนาฬิกาจะเกิดขึ้นในช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 2 ระยะ แต่ส่วนใหญ่จะอยู่ในระยะสุกแก่และเก็บเกี่ยว

### 5.3. รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด (figure-eight loop)

1) จากการศึกษาสาเหตุที่ทำให้เกิดรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดมีปัจจัยลักษณะของน้ำท่าที่มีอยู่เดิมมีปริมาณมากในลำธารอยู่ก่อนที่จะมีฝนตก (Nadal et al., 2008)

2) รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนปานกลาง มีความหนักเบาของฝนที่ระดับหนัก และระยะเวลาที่ฝนตกมากกว่า 30 นาที ส่วนปริมาณน้ำท่าและความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยอยู่ที่ระดับน้อย และจะเห็นว่ารูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดจะเกิดขึ้นในช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 3 ระยะ ได้แก่ ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบ ระยะออกดอก และระยะสุกแก่และเก็บเกี่ยวจำนวนครั้งที่เกิด 1, 2 และ 4 ครั้ง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นในระยะสุกแก่และเก็บเกี่ยว

### 5.4. รูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ (single line plus a loop)

รูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบนั้นสามารถเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นร่วมกันระหว่างรูปแบบเส้นเดียวตรงกับวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาได้ (Axelsson, 1967) เหตุผลและปัจจัยดังที่ได้อธิบายไว้ในรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาและวงรอบหมุนวนเข็มนาฬิกาซึ่งรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบนี้จะเกิดขึ้นในช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนปานกลาง มีความหนักเบาของฝนที่ระดับหนักมาก และระยะเวลาที่ฝนตกน้อยกว่า 30 นาที ส่วนปริมาณน้ำท่าและความเข้มข้น

ตะกอนแขวนลอยอยู่ที่ระดับน้อย ส่วนรูปแบบเส้นเคียวตามด้วยวงรอบจะเกิดขึ้นในช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในระยะสะสมน้ำหนักเมล็ดเท่านั้น

## 6. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในแต่ละรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซาร์อย

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นและน้ำท่าช่วงน้ำลดในแต่ละรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซาร์อยมีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ที่ต่างกัน และลักษณะของกราฟน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นและน้ำท่าช่วงน้ำลดที่มีค่าความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยต่างกัน อธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 6.1 รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา (clockwise loop)

ความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นทั้งสองเหตุการณ์มีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ที่ต่างกัน โดยมีลักษณะความสัมพันธ์ในรูปแบบ linear และ logarithm ส่วนรูปแบบสมการความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำลดมีรูปแบบสมการแตกต่างกัน เช่นกัน คือ รูปแบบ polynomial และ power ดังตารางที่ 8 ภาพผนวกที่ 1 และภาพผนวกที่ 2 จากการศึกษาจะเห็นได้ว่ารูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซาร์อยในรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกามีตะกอนแขวนลอยในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นมากกว่าน้ำท่าช่วงน้ำลดทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าทั้งสองเหตุการณ์เกิดขึ้นในเดือนกันยายนซึ่งเป็นฤดูฝนซึ่งมีฝนตกปริมาณมากพร้อมทั้งช่วงนี้เป็นช่วงที่ยังไม่มีการเก็บเกี่ยวข้าวโพดเลี้ยงสัตว์แต่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อยู่ในระยะสุกแก่ และอาจมีการเก็บเกี่ยวในบางพื้นที่ของกลุ่มน้ำบ้างแล้วจึงทำให้เมื่อฝนตกจึงเกิดการไหลบ่าที่รุนแรงพร้อมทั้งเกิดการชะล้างพังทลายของดินได้เร็ว

### 6.2 รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา (counter-clockwise loop)

ความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นมีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ที่ต่างกัน โดยมีลักษณะความสัมพันธ์ 3 รูปแบบ ได้แก่ exponential, logarithm และ linear ส่วนรูปแบบสมการความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำลดมีรูปแบบสมการ 2 รูปแบบ คือ power และ polynomial ดังตารางที่ 8 ภาพผนวกที่ 3 ถึง ภาพผนวกที่ 8 พบว่า รูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซาร์อยในรูปแบบ

ตารางที่ 8 สมการความสัมพันธ์น้ำท่าช่วงน้ำขึ้น และน้ำท่าช่วงน้ำลดแต่ละรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอย

| ปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอย          | น้ำท่าช่วงขึ้น                   |                |    | น้ำท่าช่วงลด                                                                              |                |     |
|------------------------------|----------------------------------|----------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----|
|                              | สมการ                            | R <sup>2</sup> | n  | สมการ                                                                                     | R <sup>2</sup> | n   |
| วงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา       |                                  |                |    |                                                                                           |                |     |
| 1 กันยายน 2550               | SSC = 60.613Q+0.0099             | 0.92           | 41 | SSC = 17014Q <sup>2</sup> -276.59Q+1.2848                                                 | 0.94           | 100 |
| 14 กันยายน 2551              | SSC = 1.0574Ln(Q)+4.3507         | 0.97           | 31 | SSC = 39.184Q <sup>1.317</sup>                                                            | 0.97           | 195 |
| วงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา       |                                  |                |    |                                                                                           |                |     |
| 15 กันยายน 2550              | SSC = 0.0134e <sup>185.84Q</sup> | 0.95           | 8  | SSC = 20.408Q <sup>0.6757</sup>                                                           | 0.9            | 34  |
| 19 กันยายน 2550              | SSC = 0.2604Ln(Q)+1.5449         | 0.91           | 22 | SSC = 3E+06Q <sup>3</sup> -94924Q <sup>2</sup> +811.37Q-1411                              | 0.85           | 44  |
| 14 กรกฎาคม 2551              | SSC = 296Q+0.0021                | 0.91           | 10 | SSC = -6E+06Q <sup>3</sup> +230647Q <sup>2</sup> -2747.9Q+14.955                          | 0.77           | 168 |
|                              |                                  |                |    | SSC = -7E+08Q <sup>5</sup> +2E+08Q <sup>4</sup> -3E+07Q <sup>3</sup> +1E+06Q <sup>2</sup> |                |     |
| 22 กรกฎาคม 2551              | SSC = 0.5912e <sup>20.295Q</sup> | 0.82           | 22 | -33835Q+302.31                                                                            | 0.75           | 158 |
| 3 กันยายน 2551               | SSC = 27.37Q+0.0266              | 0.93           | 25 | SSC = 1E+10Q <sup>4</sup> -2E+08Q <sup>3</sup> +1E+06Q <sup>2</sup> -2799.8Q+2.2757       | 0.7            | 145 |
| 7 กันยายน 2551               | SSC = 0.0438e <sup>77.63Q</sup>  | 0.97           | 24 | SSC = 1109Q <sup>1.9767</sup>                                                             | 0.9            | 159 |
| วงรอบหมุนขึ้นลงเป็นตัวเลขแปด |                                  |                |    |                                                                                           |                |     |
| 27 มิถุนายน 2550             | SSC = 0.0861e <sup>76.321Q</sup> | 0.93           | 14 | SSC = 455.02Q-2.499                                                                       | 0.98           | 58  |
| 6 กันยายน 2551               | SSC = 0.089e <sup>71.38Q</sup>   | 0.85           | 14 | SSC = 0.0664e <sup>130.7Q</sup>                                                           | 0.92           | 407 |

ตารางที่ 8 (ต่อ)

| ปรากฏการณ์ไม่ซ้ํารอย         | น้ำท่าช่วงขึ้น                                                                                               |                |    | น้ำท่าช่วงลด                                                                                                 |                |     |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----|
|                              | สมการ                                                                                                        | R <sup>2</sup> | n  | สมการ                                                                                                        | R <sup>2</sup> | n   |
| วงรอบหมุนขึ้นลงเป็นตัวเลขแปด |                                                                                                              |                |    |                                                                                                              |                |     |
| 25 กรกฎาคม 2551              | SSC = -3E+08Q <sup>4</sup> +2E+06Q <sup>3</sup> +50186Q <sup>2</sup> -385<br>-96Q+0.7164                     | 0.68           | 14 | SSC = -3E+12Q <sup>5</sup> +9E+10Q <sup>4</sup> -1E+09Q <sup>3</sup> +7E+06Q <sup>2</sup><br>- 21050Q+22.504 | 0.73           | 62  |
| 26 กรกฎาคม 2551              | SSC = 4E+11Q <sup>5</sup> -1E+10Q <sup>4</sup> +1E+08Q <sup>3</sup><br>-610949Q <sup>2</sup> +1311.4Q-0.8382 | 0.87           | 12 | SSC = 2E+07Q <sup>3</sup> -353649Q <sup>2</sup> +2038.6Q-3.0369                                              | 0.72           | 128 |
| 2 กันยายน 2551               | SSC = 22.632Q-0.0472                                                                                         | 0.77           | 8  | SSC = -3E+07Q <sup>4</sup> +2E+06Q <sup>3</sup> -52736Q <sup>2</sup> +530.27Q-0.3763                         | 0.74           | 416 |
| 20 กันยายน 2550              | SSC = 0.0493e <sup>93.239Q</sup>                                                                             | 0.89           | 10 | SSC = 0.1651e <sup>63.136Q</sup>                                                                             | 0.97           | 121 |
| 10 กันยายน 2551              | SSC = 46.566Q-0.7978                                                                                         | 0.94           | 32 | SSC = 40.24Q-0.8898                                                                                          | 0.98           | 85  |
| เส้นเดียวตามด้วยวงรอบ        |                                                                                                              |                |    |                                                                                                              |                |     |
| 29 สิงหาคม 2550              | SSC = 437.71Q <sup>1.5211</sup>                                                                              | 0.92           | 20 | SSC = 4251.1Q <sup>1.9275</sup>                                                                              | 0.93           | 30  |
| 30 สิงหาคม 2550              | SSC = 4E+06Q <sup>3</sup> -110469Q <sup>2</sup> +885.16Q-1.5694                                              | 0.83           | 9  | SSC = 0.2187e <sup>154.71Q</sup>                                                                             | 0.92           | 80  |
| 29 สิงหาคม 2550              | SSC = 0.2455e <sup>92.532Q</sup>                                                                             | 0.95           | 18 | SSC = 9E+06Q <sup>3.7678</sup>                                                                               | 0.92           | 30  |

หมายเหตุ - : y = ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (กรัมต่อลิตร)

x = ปริมาณน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

ของปรากฏการณ์ไม่ซำรอยในรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกาจะมีตะกอนแขวนลอยในน้ำทำช่วงน้ำขึ้นน้อยกว่าน้ำทำช่วงน้ำลดจากการสังเกตสามารถอธิบายได้ว่าวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกาเหตุการณ์นั้นเกิดขึ้นในฤดูฝนซึ่งมีฝนตกปริมาณมากแต่พื้นที่ลุ่มน้ำปกคลุมไปด้วยต้นข้าวโพดเลี้ยงและหญ้าจึงทำให้เกิดการชะล้างดิน และการไหลบ่าได้น้อย

### 6.3 รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด (figure-eight loop)

รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดของความสัมพันธ์ในช่วงน้ำทำช่วงน้ำขึ้นและน้ำทำช่วงน้ำลดมีรูปแบบสมการความสัมพันธ์เหมือนกันคือ exponential, polynomial และ linear ดังตารางที่ 8 ภาพผนวกที่ 9 ถึง ภาพผนวกที่ 15 พบว่า รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดเป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นทั้งในช่วงต้นฤดูฝน และฤดูฝน โดยรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซำรอยเกิดขึ้นตั้งแต่มีการเริ่มปลูกข้าวโพดใหม่ ๆ จนถึงช่วงสุกและเก็บเกี่ยว

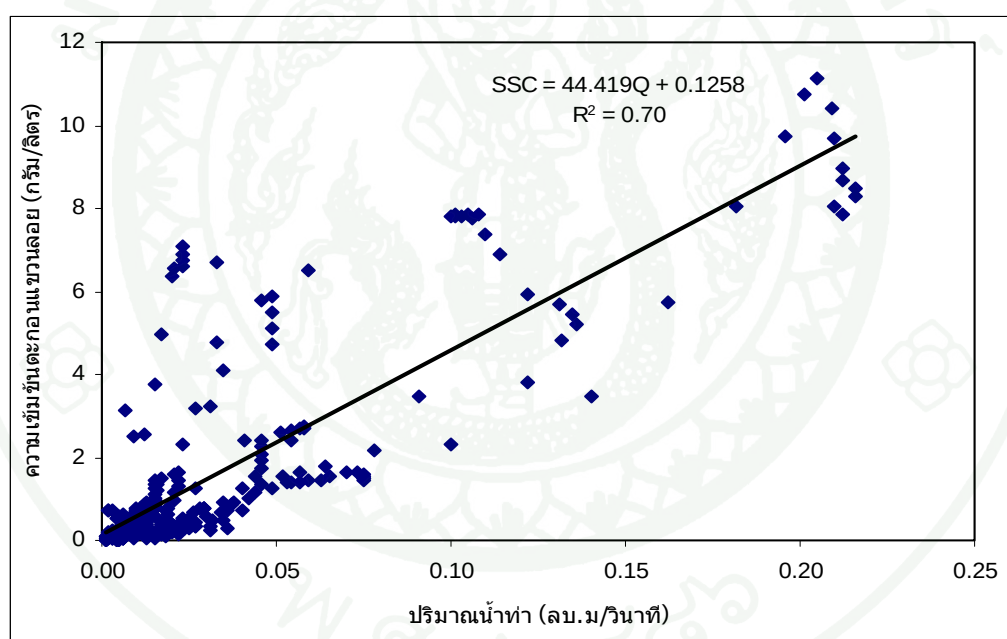
### 6.4 รูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ (single line plus a loop)

ความสัมพันธ์ของช่วงน้ำทำช่วงน้ำขึ้นมีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ 3 รูปแบบ คือ power, polynomial และ exponential ส่วนน้ำทำช่วงน้ำลดมีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ 2 รูปแบบ คือ power และ exponential ดังตารางที่ 8 ภาพผนวกที่ 16 ถึง ภาพผนวกที่ 18 ซึ่งรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบที่มีลักษณะที่ตะกอนแขวนลอยในน้ำทำช่วงน้ำขึ้นมากกว่าน้ำทำช่วงน้ำลดโดยเกิดขึ้นในช่วงฤดูฝนแต่จะเห็นว่าเกิดขึ้นในเดือนสิงหาคมทั้ง 3 เหตุการณ์ ซึ่งเดือนสิงหาคมเป็นเดือนที่ฝนตกน้อยหรือมีการเว้นการตกของฝน และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ได้ปกคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำโดยส่วนใหญ่จึงทำให้การเกิดการชะล้างดินน้อย

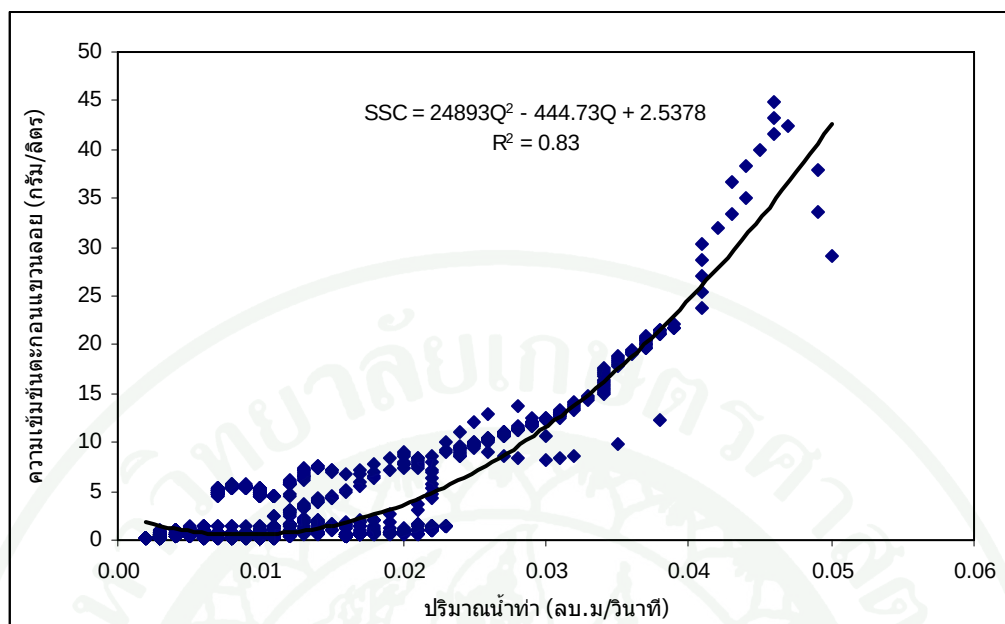


## 7. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น และน้ำท่าช่วงน้ำลด

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น และน้ำท่าช่วงน้ำลดของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่ จากการวิเคราะห์สมการถดถอย โดยแบ่งเป็นความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น ดังภาพที่ 35 โดยมีลักษณะความสัมพันธ์ในรูปแบบเส้นตรง (linear) ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 0.70 และความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำลด ดังภาพที่ 36 โดยมีลักษณะความสัมพันธ์ในรูปแบบ polynomial มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 0.83 มีรูปแบบของสมการดังนี้



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาโน จังหวัดแพร่



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยของน้ำท่าช่วงน้ำลดในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่

สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าและความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น

$$SSC = 44.419Q + 0.1258 \quad (R^2 = 0.70) \quad (3)$$

โดยที่

SSC = ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (กรัมต่อลิตร)

Q = ปริมาณน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าและความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยของน้ำท่าช่วงน้ำลด

$$SSC = 24893x^2 - 444.73Q + 2.5378 \quad (R^2 = 0.83) \quad (4)$$

โดยที่

SSC = ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (กรัมต่อลิตร)

Q = ปริมาณน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การศึกษารูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอย (hysteresis loops) แต่ละเหตุการณ์ที่ฝนตก ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ ได้ดำเนินการวิจัยโดยใช้ข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2551 จากเขื่อนวัดน้ำ และตะกอนแบบ 120° V-notch weir ของสถานีวิจัยลุ่มน้ำยม กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช รวมทั้งจำแนกรูปแบบพร้อมอธิบายให้เหตุผลในแต่ละรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอย ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ มีผลการศึกษาพอสรุปได้ ดังนี้

การศึกษาความสัมพันธ์รายเดือนระหว่างปริมาณน้ำท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอยในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยหมาไน จังหวัดแพร่ ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2551 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.91 โดยมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เชิงเส้นในรูปแบบของยกกำลัง (power)

ส่วนการศึกษารูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยในแต่ละครั้งที่ฝนตก โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่าและความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยรายนาทิจ ระหว่างปี พ.ศ. 2550-2551 มีทั้งหมด 18 เหตุการณ์ แบ่งได้ 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา รูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด และรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ โดยปัจจัยที่ได้ พิจารณา คือ ลักษณะของฝน น้ำท่า ตะกอนแขวนลอย และระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งพบว่าจากการศึกษาปัจจัยทั้งด้านน้ำฝน น้ำท่า ตะกอนแขวนลอย และระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พบว่า รูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกาจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนน้อยถึงปานกลาง มีความหนักเบาของฝนที่ระดับเบาถึงหนักมาก และระยะเวลาที่ฝนตกเท่ากับหรือน้อยกว่า 30 นาที ปริมาณน้ำท่ามีปริมาณน้อยถึงปานกลาง ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยอยู่ในระดับน้อย และเกิดขึ้นในช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในระยะสุกแก่และเก็บเกี่ยวเพียงระยะเดียว รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกาจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนปานกลาง มีความหนักเบาของฝนที่ระดับหนักมาก และระยะเวลาที่ฝนตกมากกว่า 30 นาที ปริมาณน้ำท่าและความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยอยู่ที่ระดับน้อย และเกิดขึ้นในระยะสุกแก่และเก็บเกี่ยว ส่วนรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีปริมาณน้ำฝน

ปานกลาง มีความหนักเบาของฝนที่ระดับหนัก และระยะเวลาที่ฝนตกมากกว่า 30 นาที ส่วนปริมาณน้ำท่าและความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยอยู่ที่ระดับน้อย และเกิดขึ้นในระยะสุกแก่และเก็บเกี่ยวเป็นส่วนใหญ่ และรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบจะเกิดขึ้นในช่วงที่ปริมาณน้ำฝนปานกลาง มีความหนักเบาของฝนที่ระดับหนักมาก และระยะเวลาที่ฝนตกน้อยกว่า 30 นาที ส่วนปริมาณน้ำท่าและความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยอยู่ที่ระดับน้อย และเกิดขึ้นในระยะ สะสมน้ำหนักเม็ดเท่านั้น

ส่วนการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น และน้ำท่าช่วงน้ำลดแต่ละรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซำรอยมีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน พบว่ารูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา มีความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นแบบ linear และ logarithm ส่วนความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำลดแบบ polynomial และ power รูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา มีความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น 2 แบบ ได้แก่ exponential และ logarithm ส่วนรูปแบบความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำลดมี 2 แบบ ได้แก่ power และ polynomial ส่วนรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปดมีความสัมพันธ์ในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้น และน้ำท่าช่วงน้ำลดที่มีรูปแบบความสัมพันธ์เหมือนกันคือ exponential, polynomial และ linear และรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบมีลักษณะความสัมพันธ์ของช่วงน้ำท่าช่วงน้ำท่าขึ้น 3 รูปแบบ คือ power, polynomial และ exponential ส่วนน้ำท่าช่วงน้ำลดที่มีรูปแบบความสัมพันธ์ 2 รูปแบบ คือ power และ exponential และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในน้ำท่าช่วงน้ำขึ้นมีรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (linear) ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.70 และความสัมพันธ์ของน้ำท่าช่วงน้ำลดมีความสัมพันธ์ในรูปแบบ polynomial ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.83

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาปัจจัยด้านอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยซึ่งประกอบด้วยการกระจายของฝน ปริมาณน้ำท่า อัตราการไหลบ่า อัตราการเคลื่อนย้าย ระยะทางที่เกิดการไหลบ่าในลำธารสายหลัก เวลาของการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย ตะกอนที่สะสมในท้องลำธาร และความสามารถในการสูญเสียตะกอน เป็นต้นเพื่อช่วย และสนับสนุนในการอธิบายเหตุการณ์ในแต่ละรูปแบบของปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอยได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น
2. ควรมีการตรวจสอบดูแลอุปกรณ์เก็บวัดข้อมูลน้ำท่าและตะกอนแขวนลอยอยู่ตลอดเวลา และมีการติดตั้งอุปกรณ์ให้ทันก่อนฝนตกเพื่อจะได้ข้อมูลที่ถูกต้อง และได้ครบตลอดฤดูที่ฝนตกยาวนานมากยิ่งขึ้น
3. ควรมีการตัดตะกอนที่ค้างหน้าเขื่อนวัดน้ำออกทุกครั้งหลังฝนตก เพื่อจะได้ข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น
4. ควรศึกษาทิศทางการตกของฝนที่ตกในแต่ละครั้งเพื่อช่วยบอกลักษณะการเกิดของตะกอน และการไหลบ่าของน้ำท่าได้ดียิ่งขึ้น
5. ควรตั้งเครื่องสูบน้ำเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอยตรงจุดลงเขื่อนวัดน้ำเพื่อไม่ให้เกิด antecedent sediment



## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. 2518. **แผนที่ธรณีวิทยา**. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2545. **แผนที่กลุ่มชุดดิน**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2550. **แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2547. **ภูมิอากาศของประเทศไทย**. แหล่งที่มา:

[http://www.tmd.go.th/knowledge/know\\_weather01\\_n.html](http://www.tmd.go.th/knowledge/know_weather01_n.html), 1 พฤษภาคม 2553.

เกษม จันทร์แก้ว. 2526. **หลักการจัดการลุ่มน้ำ**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2539. **หลักการจัดการลุ่มน้ำ**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2526. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ โชติบาล. 2525. **อิทธิพลของลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำและการทำลายป่าไม้ต่อปริมาณน้ำในลำธารลุ่มน้ำภาคตะวันออกของประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพนธ์ ตั้งธรรม. 2527. **การควบคุมการชะล้างพังทลายของดิน**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา-คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2545. **แบบจำลองคณิตศาสตร์การชะล้างพังทลายของดินและมลพิษตะกอนในพื้นที่ลุ่มน้ำ**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นริสา หลีกาญจนะ. 2546. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยรายปีในแม่น้ำกับปัจจัย  
ต่างๆ ทางด้านน้ำฝนน้ำท่า และคุณลักษณะของกลุ่มน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิวัติ เรืองพานิช. 2513. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและลักษณะการไหลของน้ำในลำธาร  
ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย เชียงใหม่. การวิจัยลุ่มน้ำห้วยคอกม้า เล่มที่ 6. ภาควิชาอนุรักษ์  
วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

บุญช่วย ชุนหกิจ. 2536. อิทธิพลของลักษณะทางภูมิกายภาพของกลุ่มน้ำและการทำลายป่า ต่อ  
ลักษณะการไหลของน้ำในลำธารในลุ่มน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญปลูก นาประกอบ. 2523. การไหลของน้ำในลำธารลุ่มน้ำขนาดเล็กป่าเบญจพรรณผสมไผ่ ที่  
สถานีวิจัยเพื่อรักษาต้นน้ำแม่กลอง ลี้่นถิ่น ทองผาภูมิ กาญจนบุรี. ในรายงานการสัมมนา  
ทางอุทกวิทยา สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ. 2523.

เพิ่มศักดิ์ มกราริมย์. 2522. ลักษณะอุทกวิทยาของดินที่สัมพันธ์กับน้ำในลำธารช่วงฤดูแล้งฝน  
ของป่าดิบเขาธรรมชาติภาคเหนือของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา. 2529. การวิจัยการจัดการลุ่มน้ำบนภูเขาที่ห้วยคอกม้า บนดอยปุย เชียงใหม่.  
คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2550. รายงานการวิเคราะห์ลุ่มน้ำแม่ถาง (สถานีวิจัยลุ่มน้ำยม)  
อำเภอร้องกวาง จังหวัดแพร่. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วีระพล เต็มสมบัติ. 2531. อุทกวิทยาประยุกต์. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- สถานีวิจัยลุ่มน้ำยม. 2550. ข้อมูลตรวจอากาศห้วยหม่าใน อำเภอร้องกวาง จังหวัดแพร่. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ. (อัคราณา)
- สุวรรณ ขุนานนท์. 2537. ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อปริมาณน้ำท่าและตะกอนแขวนลอยในลุ่มน้ำป่าสัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Alexandrov, Y., B. Jonathan and I. Reid. 2007. **Intra-Event and Inter-Seasonal Behaviour of Suspended Sediment in Flash Floods of the Semi-Arid Northern Negev, Israel.** Geomorphology. 85: 85-97.
- Arnborg, L., H.J. Walker and J. Peippo. 1967. **Suspended Load in the Colville River, Alaska.** Geogr. Ann. 49(2): 131-144.
- Axelsson, V. 1967. **The Laitaure Delta a Study of Deltaic Morphology and Processes.** Geogr. Ann. 49(1): 1-127.
- Dingman, S.L. 2002. **Physical Hydrology.** 2<sup>nd</sup> ed. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Heidel, S.G. 1956. **The Progressive Lag of Sediment Concentration with Flood Wave.** Geophys. Union. 37(1): 56-66.
- Hewlet, J.D. and W.L. Nutter. 1969. **An Outline of Forest Hydrology.** University of Georgia Press, Athen.
- Jitseri, P. 1983. **Seasonal Streamflow of the Pasak River.** Royal Irrigation Department Ministry of Agriculture, Bangkok.

- Kilinc, M. and E.V. Richardson. 1973. **Mechanics of Soil Erosion from Overland Flow Generted by Simulated Rainfall**. Hydrology Paper No.63, Colorado State University, USA.
- Kirkby, M.J. 1978 a. **Hillslope Hydrology: Overland Flow**. United States Geological Survey. Colorado, USA.
- \_\_\_\_\_. 1978 b. **Hillslope Hydrology**. Wiley, New York.
- Kittredge, J. 1948. **Forest Influence**. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Nadal-Romero, E., D Regues and J. Latron. 2008. **Relationships among Rainfall, Runoff, and Suspended Sediment in a Small Catchment with Badlands**. Journal of Catena. 74: 127-136.
- Taylor, C.H. 1967. **Relation Between Geomorphology and Streamflow in Selected New Zealand River Catchments**. Journal of Hydrology. 2: 106-112.
- Williams, G.P. 1989. **Sediment Concentration Versus Water Discharge during Single Hydrologic Events in Rivers**. Journal of Hydrology. 111(1): 89-106.
- Wischmeier, W.H. 1958. **Rainfall Energy and Relationship to Soil Loss**. Transaction, American Geophysical Union. 39: 285-291.
- Wood, P.A. 1977. **Controls of Variation in Suspended Sediment Concentration in the River Rother, West Sussex, England**. Sedimentology. 24(3): 437-445.





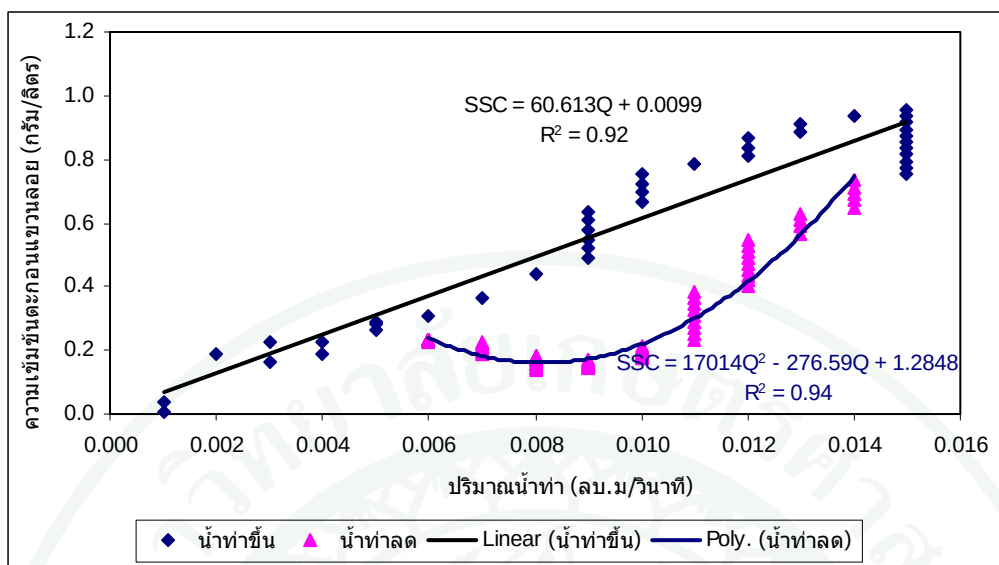
### ตารางผนวกที่ 1 เกณฑ์ปริมาณน้ำฝน และความหนักเบาของฝน

| เกณฑ์ปริมาณฝน/ความหนักเบาของฝน                 | ความหมาย    |
|------------------------------------------------|-------------|
| ปริมาณฝน (มม.)                                 |             |
| 0.1 – 10.0                                     | ฝนตกล็กน้อย |
| 10.1 – 35.0                                    | ฝนตกปานกลาง |
| 35.1 – 90.0                                    | ฝนหนัก      |
| 90.1 มม. ขึ้นไป                                | ฝนหนักมาก   |
| ความหนักเบาของฝนในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง (มม./ชม.) |             |
| 0.1 – 5.0                                      | ฝนตกเบา     |
| 5.1 – 25.0                                     | ฝนตกปานกลาง |
| 25.1 – 50.0                                    | ฝนหนัก      |
| 50.0 มม. ขึ้นไป                                | ฝนหนักมาก   |

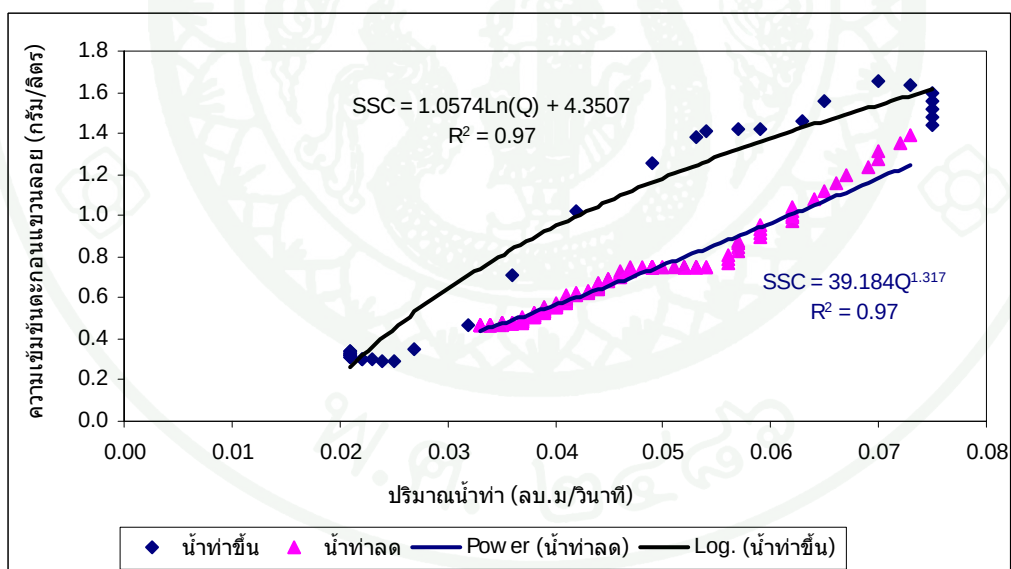
ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2547)

### ตารางผนวกที่ 2 เกณฑ์ปริมาณน้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหามาใน จังหวัดแพร่

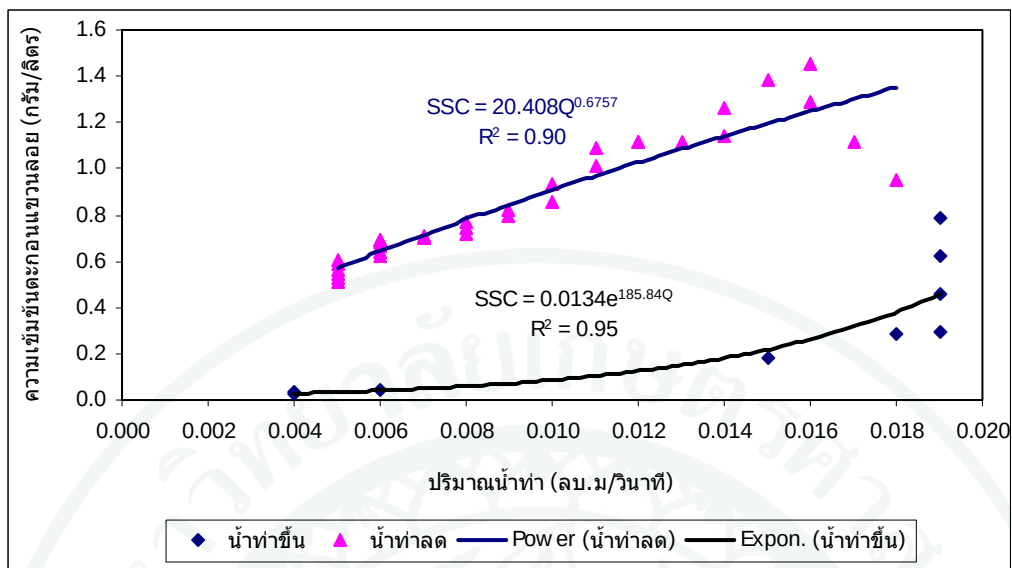
| เกณฑ์ปริมาณน้ำท่า/ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย | ความหมาย |
|-------------------------------------------|----------|
| ปริมาณน้ำท่า (ลบ.ม/วินาที)                |          |
| 0.001 – 0.035                             | น้อย     |
| 0.036 – 0.070                             | ปานกลาง  |
| 0.071 – 0.105                             | มาก      |
| ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (กรัม/ลิตร)       |          |
| 0.1 – 3.3                                 | น้อย     |
| 3.4 – 6.6                                 | ปานกลาง  |
| 6.7 – 10.0                                | มาก      |



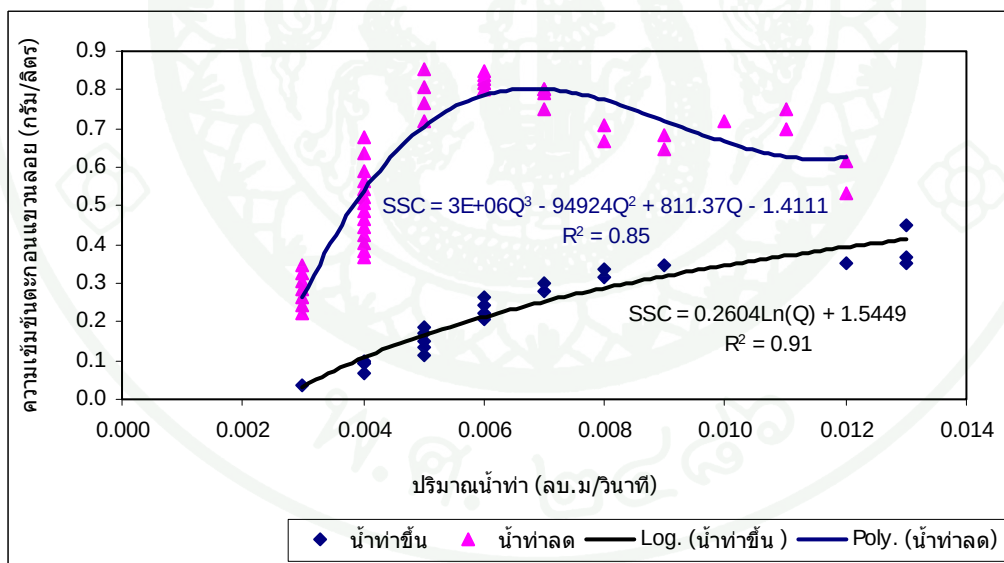
ภาพผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2550



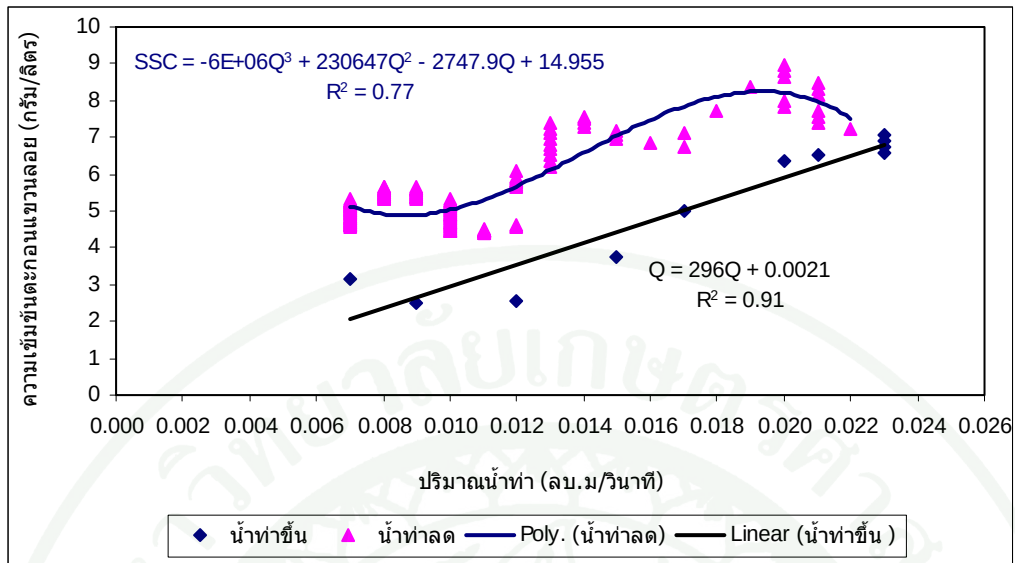
ภาพผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนตามเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2551



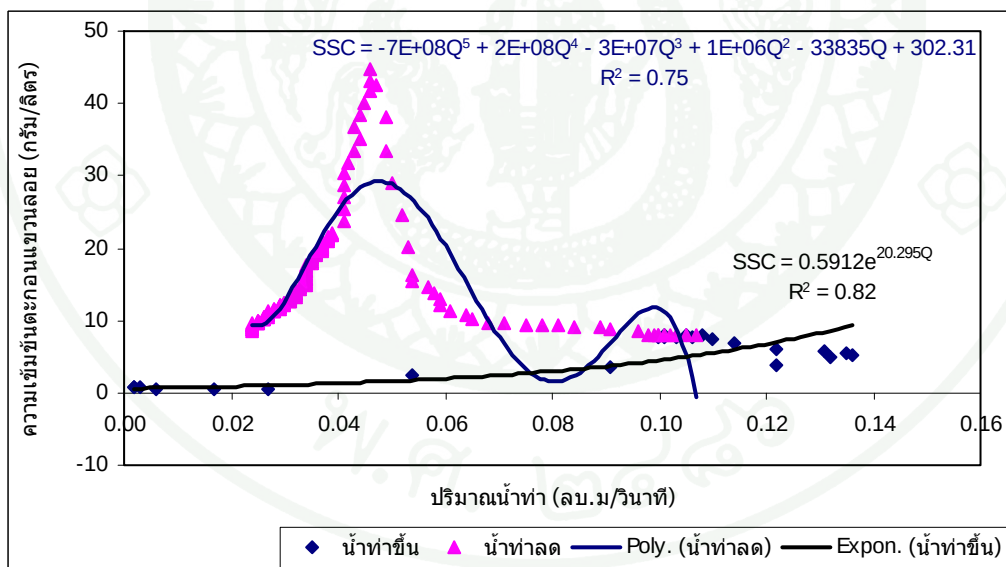
ภาพผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย  
ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2550



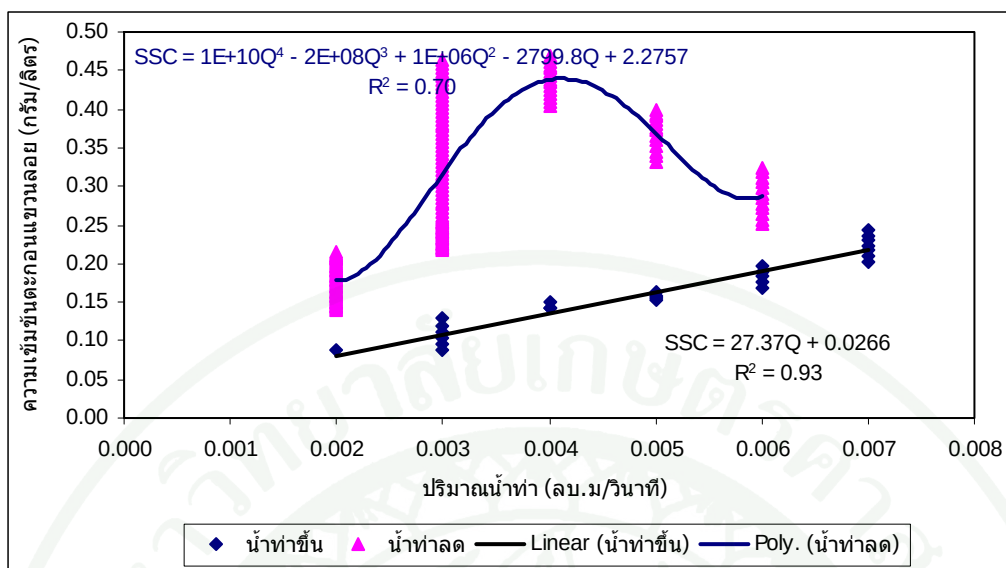
ภาพผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย  
ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2550



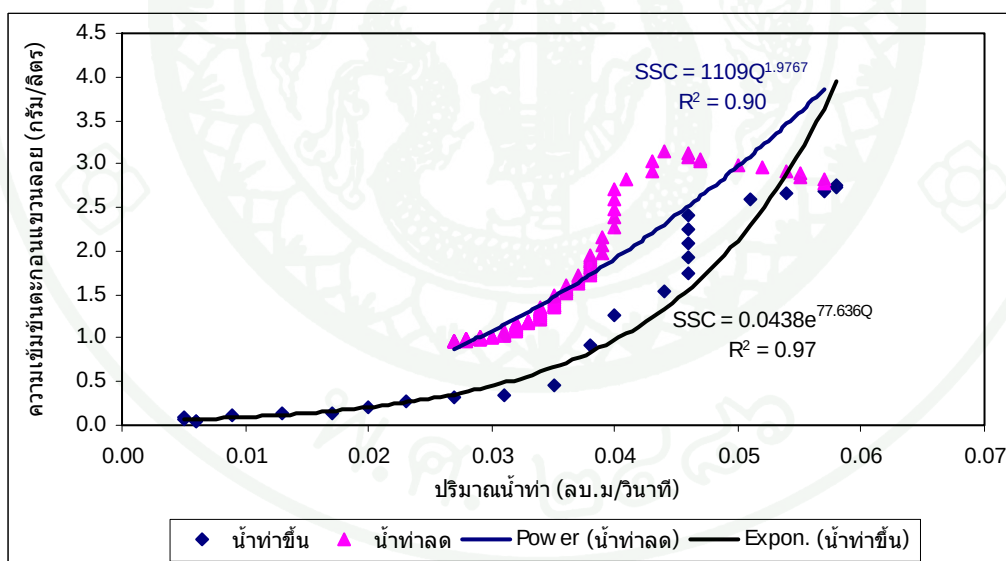
ภาพผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2551



ภาพผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2551

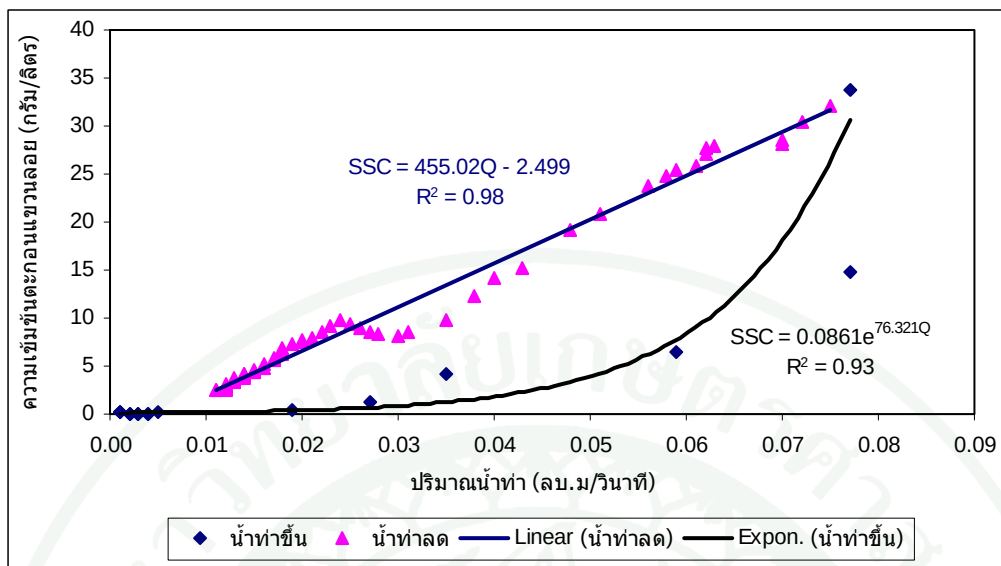


ภาพผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2551

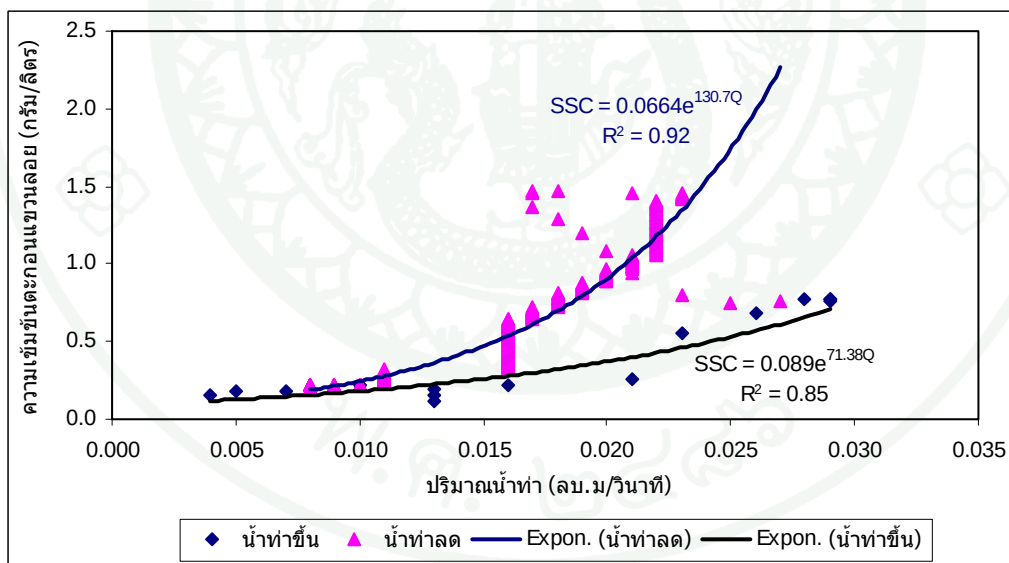


ภาพผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2551

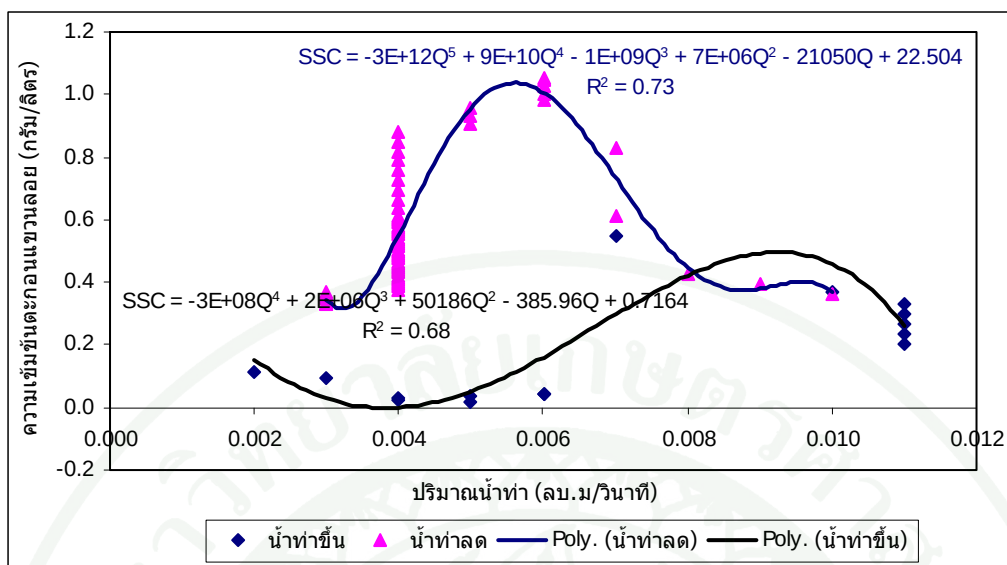




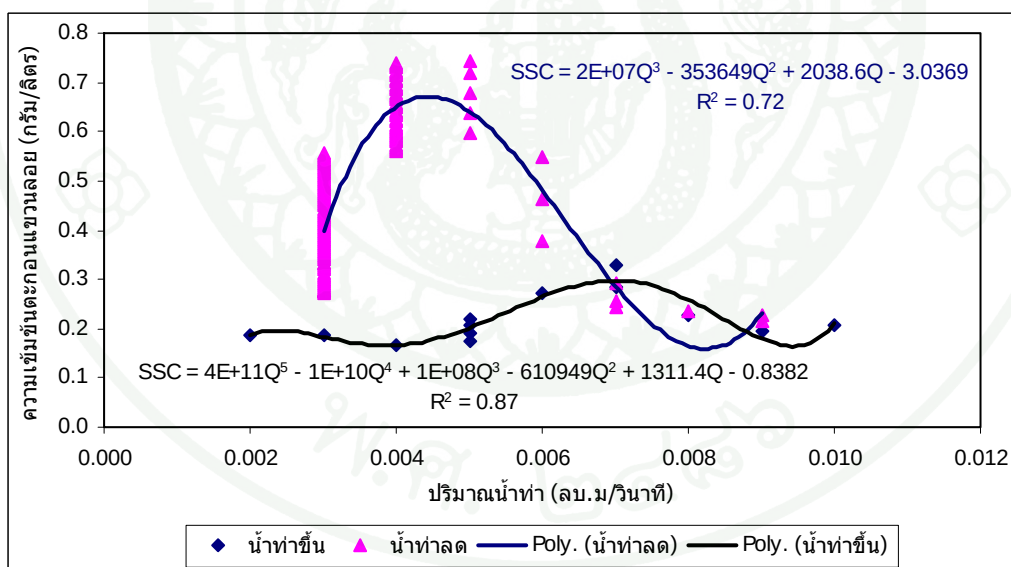
ภาพผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 27 มิถุนายน พ.ศ. 2550



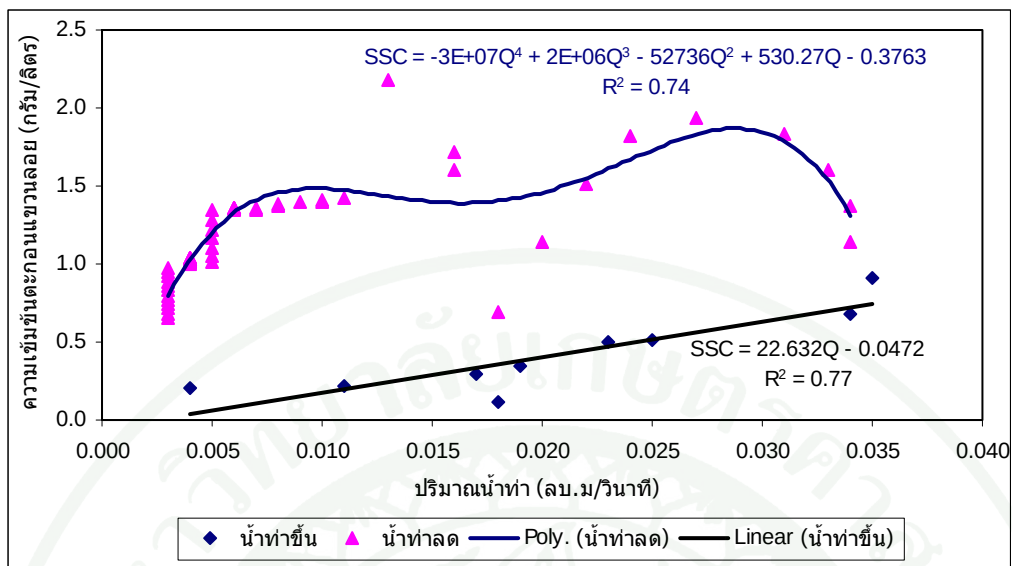
ภาพผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2551



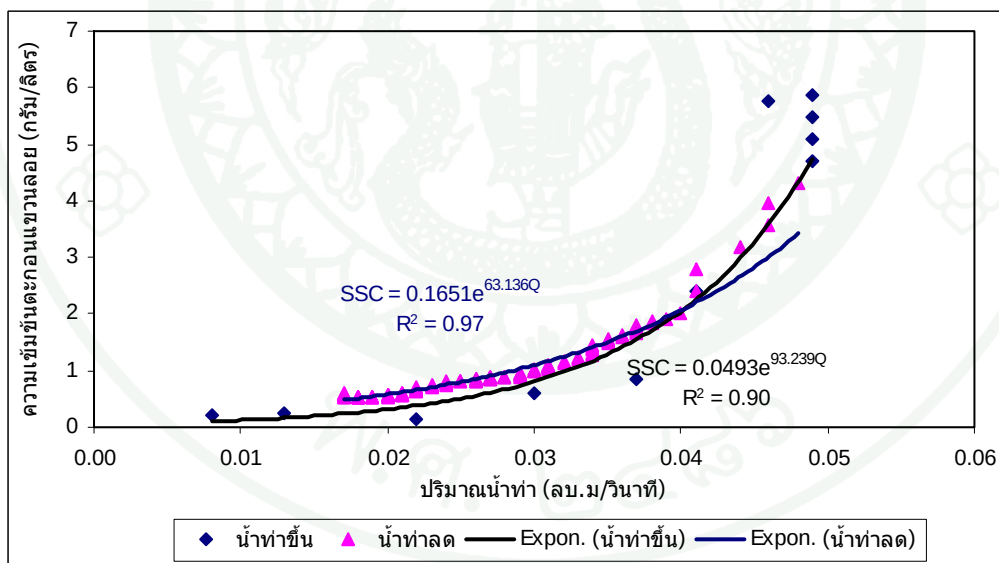
ภาพผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2551



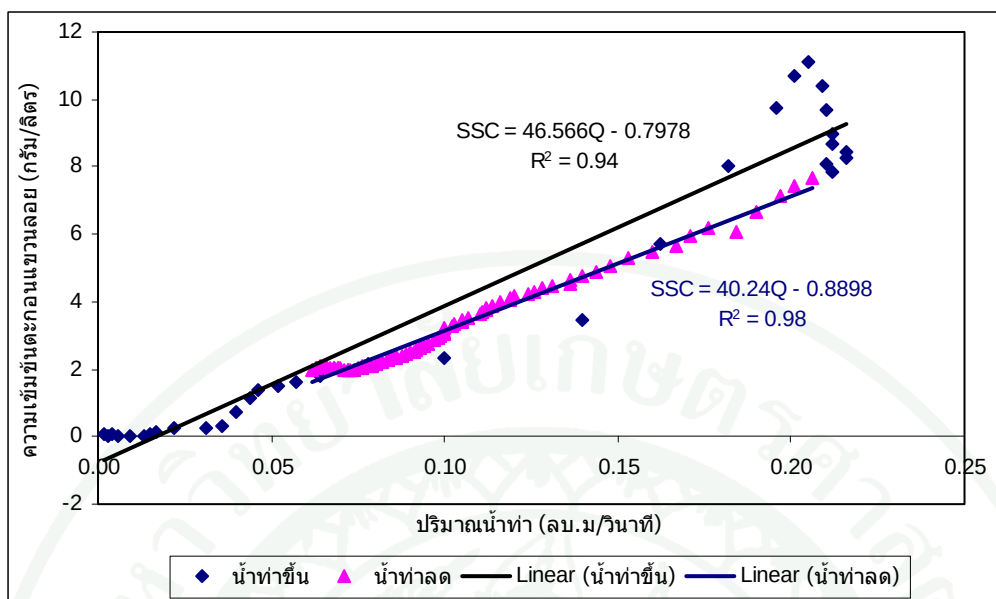
ภาพผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2551



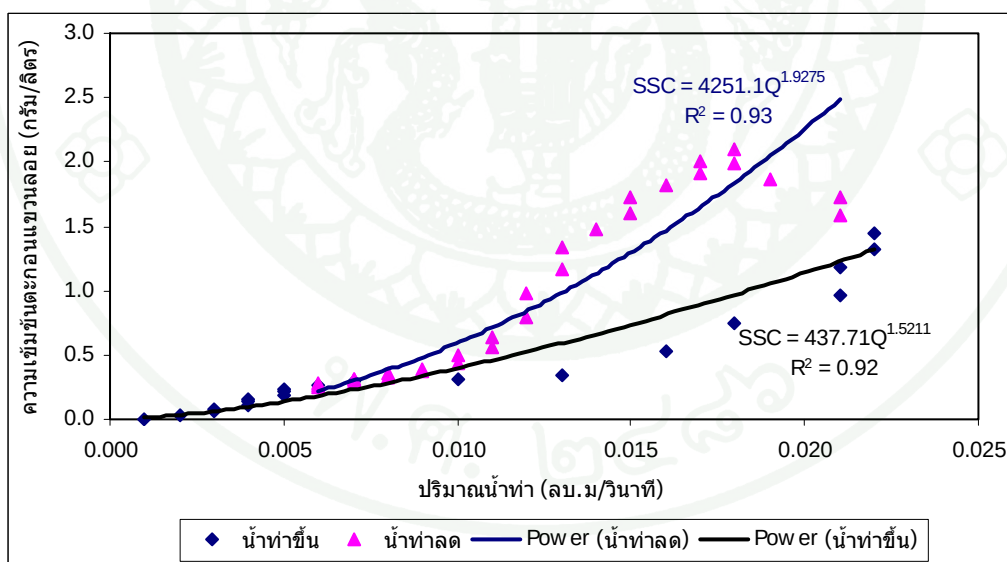
ภาพผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2551



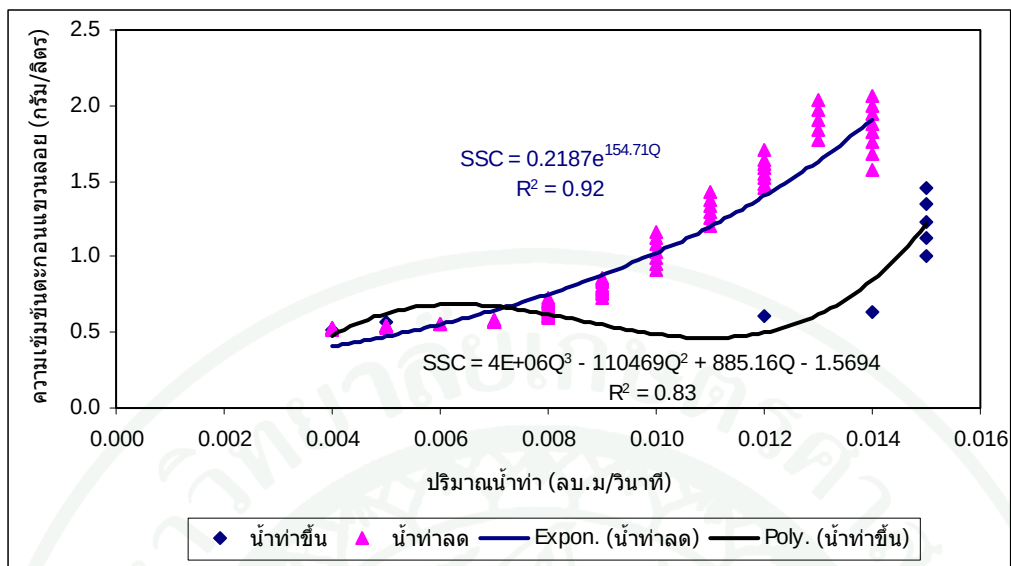
ภาพผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 20 กันยายน พ.ศ. 2550



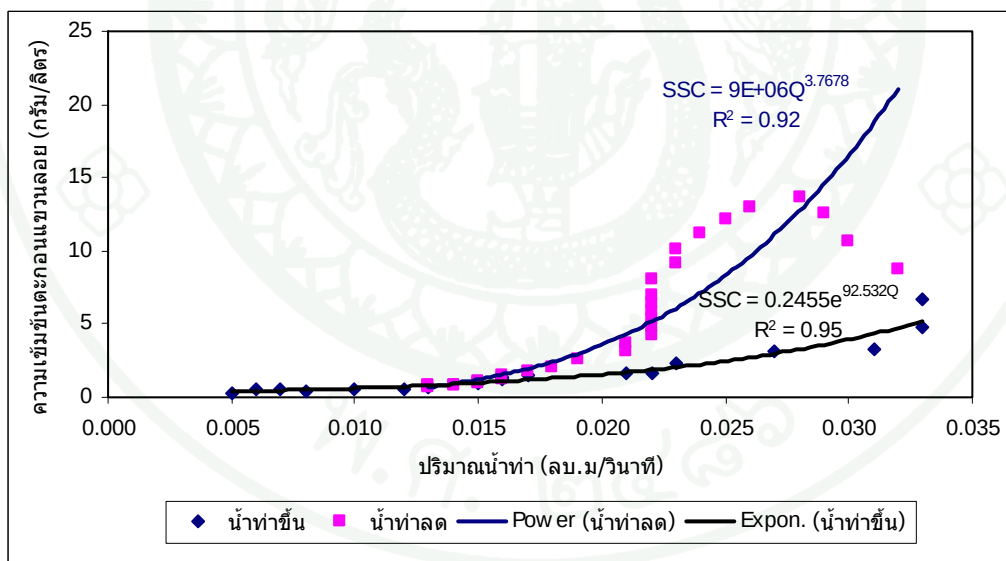
ภาพผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ของรูปแบบวงรอบหมุนขึ้นลงคล้ายตัวเลขแปด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2551



ภาพผนวกที่ 16 ความสัมพันธ์ของรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2550



ภาพผนวกที่ 17 ความสัมพันธ์ของรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2550



ภาพผนวกที่ 18 ความสัมพันธ์ของรูปแบบเส้นเดียวตามด้วยวงรอบ ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยหมาไน จังหวัดแพร่ เมื่อวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2551



## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

|                                |                                                        |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------|
| ชื่อ –นามสกุล                  | นางสาวทองพูน วรคุรุฑ                                   |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด           | 16 ธันวาคม พ.ศ. 2527                                   |
| สถานที่เกิด                    | ศรีสะเกษ                                               |
| ประวัติการศึกษา                | วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วนศาสตร์)<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน   | -                                                      |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน           | -                                                      |
| ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ | -                                                      |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ           | -                                                      |