

อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Total Sediment Load of Rivers in the North of Thailand

Miss Kanokporn Lertdechapat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Water Resources Engineering

Department of Water Resources Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือ ของประเทศไทย
โดย	นางสาวกนกพร เลิศเดชาภัทร
สาขาวิชา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เสรี จันทโรยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เสรี จันทโรยธา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยพันธุ์ รักรวิชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพฑูรย์ กิติสุนทร)

กนกพร เลิศเดชาภัทร : อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย (Total Sediment Load of Rivers in the North of Thailand) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เสรี จันทโรยธา, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์, 201 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมในการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย สำหรับวิธีการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนของแม่น้ำธรรมชาติ ได้ผนวกแนวคิดเชิงชลศาสตร์ที่ใช้สมการการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Laursen และ แนวคิดเชิงอุทกวิทยาที่ใช้ความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนกับอัตราการไหลของน้ำเข้าด้วยกัน ในการศึกษาใช้ข้อมูลการสำรวจตะกอนภาคสนามของกรมชลประทาน ไพฑูรย์ (2535) และ Bidorn et al. (2015) เป็นข้อมูลหลัก อีกทั้งยังมีข้อมูลการสำรวจแม่น้ำภาคสนามระหว่างวันที่ 25-29 ธันวาคม 2558 ของตัวอย่างวัสดุตะกอนท้องน้ำ 35 ชุดข้อมูลจาก 17 หน้าตัดแม่น้ำ ของแม่น้ำปิง แม่น้ำวัง แม่น้ำยม และแม่น้ำน่าน ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำ พบว่า แม่น้ำปิงและแม่น้ำวังมีขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำส่วนใหญ่เป็นตะกอนทรายขนาดหยาบมาก วัสดุท้องน้ำแม่น้ำยมมีขนาดเฉลี่ยตั้งแต่ทรายขนาดละเอียดไปจนถึงทรายขนาดหยาบ และแม่น้ำน่านส่วนใหญ่มีวัสดุท้องน้ำเป็นทรายกลาง เมื่อเปรียบเทียบผลการสำรวจอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยและอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม กับ ผลการประเมินที่ได้จากการคำนวณ 5 วิธี คือ 1) วิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล 2) วิธี Laursen 3) วิธีดัดแปลงโค้งของ Laursen 4) วิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden และ 5) วิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าวิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน ให้ผลการประเมินที่ดีที่สุด เมื่อวิเคราะห์หองค์ประกอบของปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดด้วยวิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน พบว่า ร้อยละ 40 เป็นปริมาณตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ และอีกร้อยละ 60 เป็นตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ ส่วนการประเมินปริมาณตะกอนท้องน้ำด้วยวิธี Laursen ได้สัดส่วนของปริมาณตะกอนท้องน้ำเทียบกับปริมาณตะกอนแขวนลอยมีค่าอยู่ในช่วง 0% ถึง 60%

ภาควิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5770102921 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS: SEDIMENT TRANSPORT / BED MATERIAL LOAD / SUSPENDED SEDIMENT LOAD / LAURSEN FORMULA / ESTIMATION

KANOKPORN LERTDECHAPAT: Total Sediment Load of Rivers in the North of Thailand. ADVISOR: ASSOC. PROF. SEREE CHANYOTHA, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. ANURAK SRIARIYAWAT, Ph.D., 201 pp.

This study was aimed at determining an appropriate method of estimating total sediment load of rivers in the north of Thailand. Hydraulic concept enhancing Laursen (1958) sediment transport formula and hydrologic concept based on a simple relation between sediment discharge and water discharge were conjunctively used to describe total sediment load of natural streams. Available field observation data of stream bed material and sediment discharges of the Ping, Wang, Yom, and Nan rivers previously collected by the Royal Irrigation Department (RID), Paitoon (2537) and Bidorn et al. (2015) were used in this investigation. In addition, thirty-fifth sets of bed material sediment were collected from 17 river sections of the Ping, Wang, Yom and Nan rivers during the field survey conducted on 25-29 December 2015. Analysis of the presently collected river bed material has shown that the Ping and Wang rivers were mainly very coarse sand size and the Yom river had wide range of bed material size from fine sand to coarse sand. The Nan bed material was mainly medium sand size. A comparative study of suspended and total suspended sediment loads estimated by methods of 1) sediment-water discharge rating curve, 2) Laursen method, 3) modified Laursen curve with Nan river data, 4) Madden's modification of Laursen method, and 5) combined hydraulic and hydrologic concepts, indicated that the combined hydraulic and hydrologic concepts yielded the best results. The sequel of this method showed that the total suspended load approximately consisted 40% of suspended bed-material load and 60% of non-bed material load. Furthermore, bed load estimated by Laursen method indicated a ratio of bed load to total suspended load ranged from 0%-60%.

Department: Water Resources Engineering Student's Signature

Field of Study: Water Resources Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จอย่างสมบูรณ์ด้วยความช่วยเหลือ ความร่วมมือ และการสนับสนุน จากผู้มีพระคุณหลายท่าน

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เสรี จันทโรยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรักษ์ ศรีอริวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และ อาจารย์ ดร. บุศวรรณ บิตร ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ ตลอดจนชี้แนะข้อควรปรับปรุงในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ให้สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้รับมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัยจนสำเร็จเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนงานศึกษาวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพฑูรย์ กิตติสุนทร ที่ให้ข้อเสนอแนะและอนุเคราะห์ ข้อมูลการสำรวจตะกอนแม่น้ำน่าน สำหรับนำมาใช้ในงานศึกษาวิจัยนี้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีคุณค่าอย่างยิ่งต่อ งานการศึกษาด้านวิศวกรรมแม่น้ำของประเทศไทย และการศึกษานี้จะเป็นไปได้เลย ถ้าขาดข้อมูลที่มี คุณค่าดังกล่าวไป ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ทวนทัน กิจไพศาลสกุล และรองศาสตราจารย์ ดร. ชัยพันธุ์ รักริฉัย ที่ได้เป็นกรรมการพิจารณาวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์เครื่องมือการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย อีกทั้ง ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ การสำรวจวัสดุท้องน้ำสำหรับใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนบน และศูนย์อุทกวิทยาชลประทาน ภาคเหนือตอนล่าง กรมชลประทาน ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลการสำรวจปริมาณน้ำและข้อมูลการสำรวจ ตะกอนของสถานีในลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่าน สำหรับนำมาใช้ในงานวิจัย ตลอดจนคุณปรีชา แยมเอียด และ คุณสนอง ปะทะนงปี เจ้าพนักงานอุทกวิทยา ชำนาญงาน ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาด้านการ สำรวจข้อมูลอุทกวิทยา

ขอขอบคุณครอบครัวเลิศเดชาภัทร ที่ให้ความร่วมมือในการปฏิบัติงานภาคสนามเป็นอย่างดี ตลอดจนให้ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดมา

งานศึกษาวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนทุนจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุน รัชดาภิเษกสมโภช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3. ขอบข่ายของการศึกษา.....	4
1.4. ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.5. ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
1.6. การศึกษาที่ผ่านมา.....	6
1.6.1. การศึกษาภายในประเทศ.....	6
1.6.2. การศึกษาในต่างประเทศ.....	12
บทที่ 2 พื้นที่ศึกษา.....	23
2.1. ลุ่มน้ำปิง.....	23
2.2. ลุ่มน้ำวัง.....	23
2.3. ลุ่มน้ำยม.....	24
2.4. ลุ่มน้ำน่าน.....	25
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีการเคลื่อนที่ของตะกอน.....	29
3.1. ประเภทของการนำพาตะกอน.....	29

3.1.1. แบ่งตามชนิดของตะกอน.....	29
3.1.2. แบ่งตามกลไกการเคลื่อนที่.....	30
3.2. สมการอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม	31
3.2.1. ประเภทของสมการ.....	32
3.2.2. สมการของ Laursen.....	43
บทที่ 4 การจัดเตรียมข้อมูลและวิธีการศึกษา	46
4.1. การจัดเตรียมข้อมูล	46
4.1.1. ข้อมูลการสำรวจตะกอนแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537)	46
4.1.2. ข้อมูลอุทกวิทยา.....	49
4.1.3. คุณสมบัติของวัสดุท้องน้ำ.....	51
4.1.4. ข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็น	56
4.2. วิธีการศึกษา	64
4.2.1. การดัดแปลงสมการ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537)	67
4.2.2. การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนรวม	67
4.2.3. การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยวิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยา ร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts).....	71
4.2.4. เกณฑ์ทดสอบความถูกต้องของสมการ	72
บทที่ 5 การวิเคราะห์และผลการศึกษา.....	74
5.1. ผลการดัดแปลงสมการ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537)	74
5.2. ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนท้องน้ำ.....	78
5.3. ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนรวม.....	83
5.3.1. วิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (Sediment- Discharge Rating Curve).....	83
5.3.2. วิธีลอว์เซน (Laursen method).....	92

5.3.3. วิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เซน (modified Laursen curve) ด้วยข้อมูลแม่น้ำ น่าน 103	
5.3.4. วิธีลอว์เซนดัดแปลงโดยแมดเดน (Madden's modification of Laursen method).....	113
5.4. ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยวิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยา ร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts).....	119
5.4.1. การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ.....	119
5.4.2. การเปรียบเทียบสัดส่วนตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำจากผลการสำรวจตะกอน แขวนลอยรวม.....	126
5.5. เปรียบเทียบผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม โดยวิธีต่าง ๆ.....	139
5.5.1. เปรียบเทียบด้วยเกณฑ์วัดความถูกต้องของสมการ	139
5.5.2. ผลการคัดเลือกวิธีคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม.....	143
5.5.3. ทดสอบวิธีคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมทั้ง 5 วิธี ด้วยชุดข้อมูลแม่น้ำน่าน ของไพฑูริย์ (2537).....	147
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	151
6.1. สรุปผลการศึกษา.....	151
6.1.1. คุณสมบัติของวัสดุตะกอนท้องน้ำ.....	151
6.1.2. สรุปผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนท้องน้ำ.....	152
6.1.3. สรุปผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนรวม	153
6.2. ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	156
รายการอ้างอิง.....	158
ภาคผนวก.....	162
ภาคผนวก ก ข้อมูลการสำรวจตะกอนแม่น้ำน่านของไพฑูริย์ (2537) และการคำนวณ	163
ภาคผนวก ข รายละเอียดการเก็บตัวอย่างวัสดุตะกอนท้องน้ำ	172

ภาคผนวก ค ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำ	182
ภาคผนวก ง คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของสถานีวัดน้ำ	192
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	201



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 สรุปข้อมูลจากการทดลอง ที่ Laursen (1958) ใช้พิจารณาหาความสัมพันธ์	15
1-2 เปรียบเทียบวิธีการปรับปรุงสมการ Laursen	22
2-1 รายละเอียดตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสำรวจวัสดุท้องน้ำ	28
3-1 สรุปสมการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ (bed material load).....	34
4-1 คุณสมบัติชลศาสตร์ในลำน้ำน่านตอนล่าง กม.443-438.3 สำรวจเมื่อ มิ.ย.-ธ.ค. 2535 (ไพฑูริย์, 2537)	47
4-2 การกระจายขนาดเม็ดวัสดุท้องน้ำของแม่น้ำน่านตอนล่าง สำรวจเมื่อ ธ.ค. 2535 (ไพฑูริย์, 2537).	48
4-3 จำนวนชุดข้อมูล (จำนวนครั้งการสำรวจ) ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์	50
4-4 สรุปคุณสมบัติตัวอย่างวัสดุท้องน้ำ	52
4-5 สรุปค่าเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ (d_m).....	53
4-6 สรุปรายละเอียดของการคำนวณค่า Manning's n	59
4-7 สรุปค่าจำกัดความและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	66
4-8 ผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละวิธีการคำนวณ	72
5-1 ค่าการสำรวจปริมาณตะกอนรวมของไพฑูริย์ (2537) และค่า Q_t ที่ประเมินได้.....	77
5-2 ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี ที่คำนวณโดยวิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอน แขวนลอยกับอัตราการไหล (sediment-discharge rating curve)	92
5-3 ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี ที่คำนวณด้วย Laursen method.....	98
5-4 ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี ที่คำนวณโดยวิธีตัดแปลงโค้งของลอเรนด้วยข้อมูล แม่น้ำน่าน (modified Laursen curve).....	108
5-5 ค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยวิธี Laursen ตัดแปลงโดย Madden ของการประเมิน อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม รายลุ่มน้ำ และรายภาค	118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5-6 ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี ที่คำนวณด้วยวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden ของการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม รายลุ่มน้ำ และรายภาค....	118
5-7 จำนวนชุดข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์.....	119
5-8 ค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณโดยวิธีเชิงศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน ของการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด รายลุ่มน้ำ และรายภาค.....	125
5-9 ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี ที่คำนวณโดยวิธีเชิงศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน	125
5-10 ประมาณค่า $%Q_{sb}/Q_{st}$ และ $%Q_{sw}/Q_{st}$ ที่ช่วงอัตราไหลต่าง ๆ.....	138
5-11 ประมาณค่า $%Q_{sb}/Q_{st}$ และ $%Q_{sw}/Q_{st}$ ที่ค่าอัตราไหลเฉลี่ยของแต่ละลุ่มน้ำ.....	139
5-12 เปรียบเทียบค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน ของผลการสำรวจ กับ ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนโดยวิธีต่างๆ.....	140
5-13 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ของผลการสำรวจ กับ ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนโดยวิธีต่างๆ.....	141
5-14 เปรียบเทียบค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ของผลการสำรวจ กับ ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนโดยวิธีต่างๆ.....	142
5-15 ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมโดยวิธีต่าง ๆ ของลำดับชุดข้อมูล 10-22 ของไพฑูรย์ (2537).....	144
5-16 ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมโดยวิธีต่าง ๆ ของลำดับชุดข้อมูล 12-22 ของไพฑูรย์ (2537).....	145
5-17 ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (ต้น/วัน) ด้วยวิธีการคำนวณทั้ง 5 วิธีของลำดับชุดข้อมูล 10-22.....	149
5-18 ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (ต้น/วัน) ด้วยวิธีการคำนวณทั้ง 5 วิธีของลำดับชุดข้อมูล 12-22.....	150

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1-1 ผลการตัดแปลงโค้งของ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านและแม่น้ำกก	10
1-2 พื้นที่ศึกษาและตำแหน่งสถานีวัดน้ำของ Bidorn et al. (2015).....	11
1-3 ความสัมพันธ์ของ Laursen ระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มข้นกับสภาพทางชลศาสตร์และ ลักษณะของตะกอน	16
1-4 กราฟความสัมพันธ์ของ Madden เปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ของ Laursen	17
1-5 การตัดแปลงสมการของ Laursen โดย Madden	18
1-6 ค่า $f\left(\frac{U_*}{\omega}\right)$ สำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Copeland และ Thomas..	19
1-7 การปรับปรุงกราฟความสัมพันธ์ของ Laursen (1958) โดย Kodoatie (1999).....	21
2-1 ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสำรวจวัสดุท้องน้ำ.....	27
3-1 ประเภทของการนำพาตะกอน	30
3-2 ส่วนประกอบของตะกอนรวมแบ่งตามประเภทของตะกอน	31
3-3 ค่าฟังก์ชันของ Laursen.....	44
3-4 ความเร็วการตกอิสระของเม็ดทรงกลมในน้ำนิ่ง	45
4-1 กราฟการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำแม่น้ำปิง	54
4-2 กราฟการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำแม่น้ำวัง.....	54
4-3 กราฟการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำแม่น้ำยม	55
4-4 กราฟการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำแม่น้ำน่าน.....	55
4-5 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ของสถานีในกลุ่มน้ำปิง	60
4-6 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ของสถานีในกลุ่มน้ำวัง	61
4-7 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ของสถานีในกลุ่มน้ำยม	62
4-8 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ของสถานีในกลุ่มน้ำน่าน.....	63
5-1 เปรียบเทียบผลการสำรวจจริง กับ ผลการคำนวณโดยวิธีการของ Laursen	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-2 ผลการคำนวณค่าฟังก์ชันของ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537).....	76
5-3 เปรียบเทียบผลการสำรวจตะกอนรวมของไพฑูรย์ (2537) กับ ผลการประเมินค่า Q_t ที่ได้..	77
5-4 ค่า Q_{so} กับ ผลการประเมินค่า Q_b ของสถานีในลุ่มน้ำปิง	79
5-5 ค่า Q_{so} กับ ผลการประเมินค่า Q_b ของสถานีในลุ่มน้ำวัง.....	80
5-6 ค่า Q_{so} กับ ผลการประเมินค่า Q_b ของสถานีในลุ่มน้ำยม	81
5-7 ค่า Q_{so} กับ ผลการประเมินค่า Q_b ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน.....	82
5-8 sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำปิง	84
5-9 sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำวัง.....	85
5-10 sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำยม.....	86
5-11 sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน.....	87
5-12 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำปิง..	88
5-13 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำวัง..	89
5-14 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำยม..	90
5-15 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน..	91
5-16 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{sb} จาก Laursen method ของสถานีในลุ่มน้ำปิง	94
5-17 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{sb} จาก Laursen method ของสถานีในลุ่มน้ำวัง	95
5-18 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{sb} จาก Laursen method ของสถานีในลุ่มน้ำยม	96
5-19 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{sb} จาก Laursen method ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน.....	97
5-20 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย โดยวิธี ต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำปิง.....	99
5-21 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย โดยวิธี ต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำวัง	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-22 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำยม	101
5-23 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน.....	102
5-24 เปรียบเทียบ Q _{so} กับ Q _{st} จาก modified Laursen curve ของสถานีในลุ่มน้ำปิง	104
5-25 เปรียบเทียบ Q _{so} กับ Q _{st} จาก modified Laursen curve ของสถานีในลุ่มน้ำวัง	105
5-26 เปรียบเทียบ Q _{so} กับ Q _{st} จาก modified Laursen curve ของสถานีในลุ่มน้ำวังยม .	106
5-27 เปรียบเทียบ Q _{so} กับ Q _{st} จาก modified Laursen curve ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน...	107
5-28 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำปิง.....	109
5-29 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำวัง	110
5-30 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำยม	111
5-31 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน.....	112
5-32 สมการของตัวคูณค่าปรับแก้ (Equation for adjustment factor) รายพื้นที่ลุ่มน้ำ.....	114
5-33 เปรียบเทียบ Q _{so} กับ Q _{st} จากวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden รายลุ่มน้ำ	115
5-34 สมการของตัวคูณค่าปรับแก้ (Equation for adjustment factor) รายพื้นที่ภาคเหนือ	116
5-35 เปรียบเทียบ Q _{so} กับ Q _{st} จากวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden รายพื้นที่ภาคเหนือ.	117
5-36 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q _{sw}) ของลุ่มน้ำปิง	120

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-37 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยกลุ่มน้ำ (Qsw) ของ กลุ่มน้ำวัง.....	120
5-38 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยกลุ่มน้ำ (Qsw) ของ กลุ่มน้ำยม.....	121
5-39 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยกลุ่มน้ำ (Qsw) ของ กลุ่มน้ำน่าน.....	121
5-40 เปรียบเทียบ Qso กับ Qst จากวิธีเชิงกลศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน พิจารณารายพื้นที่ กลุ่มน้ำ.....	122
5-41 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยกลุ่มน้ำ (Qsw) ของ พื้นที่ภาคเหนือ	123
5-42 เปรียบเทียบ Qso กับ Qst จากวิธีเชิงกลศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน พิจารณารายพื้นที่ ภาคเหนือ	124
5-43 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราไหล (Q) กับ ผลการสำรวจปริมาณตะกอนแขวนลอย รวม (Qso) ของแต่ละกลุ่มน้ำ.....	128
5-44 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราไหล (Q) กับ ค่าประเมินปริมาณตะกอนแขวนลอยกลุ่ม น้ำ (Qsw) ของแต่ละกลุ่มน้ำ.....	129
5-45 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างอัตราไหล (Q) กับ Qso และ Qsw ของกลุ่มน้ำปิง	130
5-46 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างอัตราไหล (Q) กับ Qso และ Qsw ของกลุ่มน้ำวัง	131
5-47 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างอัตราไหล (Q) กับ Qso และ Qsw ของกลุ่มน้ำยม	132
5-48 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างอัตราไหล (Q) กับ Qso และ Qsw ของกลุ่มน้ำน่าน	133
5-49 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างอัตราไหล (Q) กับ Qso และ Qsw ของกลุ่มน้ำ ภาคเหนือ	134

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-50 ประมาณค่า %Qsb/Qst และ %Qsw/Qst ของลุ่มน้ำปิง	135
5-51 ประมาณค่า %Qsb/Qst และ %Qsw/Qst ของลุ่มน้ำวัง.....	136
5-52 ประมาณค่า %Qsb/Qst และ %Qsw/Qst ของลุ่มน้ำยม	136
5-53 ประมาณค่า %Qsb/Qst และ %Qsw/Qst ของลุ่มน้ำน่าน.....	137
5-54 ประมาณค่า %Qsb/Qst และ %Qsw/Qst ของลุ่มน้ำในภาคเหนือ	137
5-55 สัดส่วนปริมาณตะกอนท้องน้ำเทียบกับปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (%Qb/Qst)	146
6-1 พื้นที่ท้องน้ำแม่น้ำปิง ใกล้กับสถานีวัดน้ำท่า P.15.....	157
6-2 พื้นที่ท้องน้ำแม่น้ำปิง (2) ใกล้กับสถานีวัดน้ำท่า P.15.....	157

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญ

ลำน้ำ หรือแม่น้ำ เป็นทางน้ำธรรมชาติที่มีการใช้ประโยชน์มายาวนานในหลายๆ ด้าน เช่น เป็นแหล่งน้ำสำหรับการอุปโภคบริโภค การเกษตรกรรม การประมง การปศุสัตว์ ตลอดจนเป็นทางน้ำเพื่อการส่งน้ำ ระบายน้ำหลาก และการคมนาคมทางน้ำ เป็นต้น ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพของแม่น้ำไม่ว่าจะโดยจากธรรมชาติหรือจากมนุษย์ ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอาณาวัฏของการไหล (flow regime) และ อาณาวัฏของตะกอน (sediment regime) ย่อมส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์ของแม่น้ำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของตะกอนแม่น้ำ (river sediment transport) ในงานวิศวกรรมแหล่งน้ำ มีมากมายหลากหลาย (เสรี จันทโรยธา และ ชัยพันธุ์ รักรวิชัย, 2557) เช่น

- ปัญหาการออกแบบหินทิ้ง (riprap) เพื่อป้องกันพื้นผิวทางน้ำจากการเคลื่อนที่หรือหลุดออกของวัสดุพื้นผิว โดยไม่ต้องใช้คอนกรีต เช่น การใช้หินทิ้งในการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งทางน้ำ การใช้หินทิ้งป้องกันการกัดเซาะท้องน้ำท้ายฝาย และเขื่อน
- ปัญหาที่เกี่ยวกับอายุการใช้งานของอ่างเก็บน้ำ (reservoir life)
- ปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบทางน้ำที่มีเสถียรภาพ (stable channel) เพื่อหาขนาดของทางน้ำที่เหมาะสม(ความกว้าง ความลึก ความลาดเอียงท้องน้ำ และ แนว (alignment))
- ปัญหาการกัดเซาะลดระดับท้องน้ำ (river bed degradation) การทับถมเพิ่มระดับท้องน้ำ (river bed aggradation) และการถอยร่นของตลิ่ง (bank retreat) จากการเปลี่ยนแปลงทางน้ำธรรมชาติ
- ปัญหาการกัดเซาะเฉพาะที่ (local scour) ที่เกิดกับโครงสร้าง เช่น การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน เป็นต้น

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่า การเคลื่อนที่ของตะกอนเป็นปัจจัยทางชลศาสตร์ ที่มีบทบาทสำคัญต่อลักษณะทางกายภาพของแม่น้ำ ดังนั้นข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแม่น้ำ จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ และจำเป็นอย่างยิ่ง

โดยทั่วไป หากแยกประเภทการพัดพาของตะกอน ตามกลไกการเคลื่อนที่ สามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ ตะกอนท้องน้ำ (bed load) ซึ่งเป็นส่วนของวัสดุที่เคลื่อนที่บนผิว หรือใกล้ผิวท้องน้ำในลักษณะของการกลิ้ง (rolling) การไถล (sliding) หรือ การกระโดด (saltation) ไปบนผิวท้องน้ำ และ ตะกอนแขวนลอย (suspended load) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของวัสดุที่อยู่ในลักษณะแขวนลอยอยู่เหนือชั้นของตะกอนท้องน้ำขึ้นไป โดยการพัดพาทั้ง 2 ประเภทนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเส้นทางการไหลของแม่น้ำที่เกิดจากการทับถมของตะกอน และการศึกษาปัญหาการตื้นเขินของแม่น้ำซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการคมนาคมทางน้ำ

ที่ผ่านมา ได้มีผู้พัฒนาสูตร หรือสมการเพื่อประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในทางน้ำเปิดมากมายหลายท่าน เช่น Meyer-Peter Müller (1948), Laursen (1958), Ackers-White (1973) และ Yang (1973) เป็นต้น ซึ่งเป็นสมการที่ได้มาจากการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองเป็นสำคัญ และมีข้อจำกัดของการใช้สมการที่แตกต่างกันไป ดังนั้น ในการเลือกใช้สมการเพื่อประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในลำน้ำหนึ่งๆ จึงต้องพิจารณาความเหมาะสม หรือความเข้ากันได้กับข้อมูลภาคสนามที่มีอยู่ เพื่อให้สามารถประเมินอัตราการเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงข้อมูลจริงมากที่สุด

ในการประเมินอัตราการไหลหรืออัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย (suspended sediment discharge or suspended sediment load) ของแม่น้ำต่าง ๆ ในประเทศไทย นิยมใช้สมการถดถอย (regression equation) ซึ่งได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลของตะกอนแขวนลอย กับ อัตราการไหลของน้ำ (water discharge or water flow rate) ส่วนการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (bed sediment load or bed load) ยังไม่มีวิธีการที่ใช้ในการประเมินที่เหมาะสม ซึ่งในปัจจุบันอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำนั้น จะใช้การประเมินจากอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย เพราะ การเก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ มีความสลับซับซ้อน และยุ่งยากมากกว่าการเก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย เนื่องจากลักษณะธรรมชาติของการเคลื่อนที่ตะกอนที่สัมผัสกับท้องน้ำเกือบตลอดเวลา จึงได้ข้อมูลตะกอนเป็นอนุกรมเวลา ทั้งแบบที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นผสมกับการสุ่มกระจาย และเนื่องจากการเคลื่อนที่ก่อให้เกิดคลื่นทราย สันทราย และสันดอนขึ้นในท้องน้ำ การเก็บตัวอย่างตะกอนท้องน้ำจึงมีแหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อนมากกว่า และข้อมูลที่ได้กระจายมาก จึงเป็นเหตุให้กรมชลประทานที่เป็นหน่วยงานหลักในการเก็บรวบรวมข้อมูลตะกอนของแม่น้ำต่างๆ ในประเทศไทย มีข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำที่ได้จากการสำรวจจริงน้อยมาก ปัจจุบันจึงใช้เกณฑ์คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเป็น 30% ของตะกอนแขวนลอย มาประมาณหาค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (กลุ่มงานตะกอนและคุณภาพน้ำ, 2555)

สำหรับอัตราการไหลของตะกอนแม่น้ำนั้น Kodoatie (2000) ได้รายงานไว้ว่า Gilbert (1914), Lane (1955), Laursen (1958), Bagnold (1966), Simons and Şentürk (1992) และ Yang (1996) พบว่าถึงแม่น้ำจะมีค่าความลึกการไหล อัตราการไหล ความเร็วการไหล ความลาดผิวน้ำ ความลาดพลังงาน และความเค้นเฉือนของขอบเขตทางน้ำค่าหนึ่ง แต่สามารถให้ค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแม่น้ำได้มากมายหลายค่าที่แตกต่างกัน โดย Gilbert (1914) เป็นคนแรกที่เสนอปรากฏการณ์การเกิดค่าที่แตกต่างกันของอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแม่น้ำ ซึ่งเกิดขึ้นได้แม้จะมีตัวแปรทางชลศาสตร์ (hydraulic parameters) เดียวกัน และสรุปว่าอัตราการไหลของน้ำ กับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนนั้นไม่มีความสัมพันธ์กันเลย

ดังนั้น หากสามารถหาวิธีการ หรือ สมการ ที่ใช้ในการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำที่เหมาะสมกับแม่น้ำในประเทศไทย ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่องานวิศวกรรมแหล่งน้ำที่ต้องเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของตะกอน

1.2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษามีวัตถุประสงค์ในการหาวิธีการที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจากผลการสำรวจภาคสนามเท่าที่ปรากฏอยู่ในปัจจุบันเป็นหลัก โดยมุ่งที่จะพัฒนาหรือปรับปรุง (modify) วิธีการที่เคยมีผู้เสนอมา และใช้ได้ผลดีในอดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการที่มีความเหมาะสมในการประเมิน อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในประเทศไทย โดยมุ่งไปที่แม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้ คือ

- 1) ศึกษาวิธีการที่ใช้ในการประเมิน อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำ (total sediment load of rivers) ที่มีใช้ในปัจจุบันทั้งในประเทศ และ ต่างประเทศ
- 2) พิจารณาเลือกวิธีการที่เหมาะสม ที่จะนำมาใช้เป็นแนวทางในการ พัฒนา หรือ ปรับปรุง เพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการในการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย
- 3) พัฒนา หรือ ปรับปรุง วิธีการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำ จากวิธีการที่คัดเลือกมาที่ใช้ได้ดีในปัจจุบันและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย เพื่อใช้เป็นวิธีการในการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทยได้ดี

1.3. ขอบข่ายของการศึกษา

ขอบข่ายของการศึกษาเพื่อหาวิธีการที่ใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (total sediment load) ของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย มุ่งเน้นการวิเคราะห์หาวิธีการที่เหมาะสมจากการพัฒนา หรือ ปรับปรุง จากวิธีการต่างๆที่มีอยู่ ที่จะสามารถใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือได้อย่างถูกต้อง โดยการทดสอบกับข้อมูลภาคสนามที่มีอยู่ โดยมีขอบข่ายการศึกษาดังนี้

- 1) ข้อมูลอุทกวิทยาที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลการสำรวจจริงเท่าที่มีปรากฏอยู่เป็นหลัก เช่น อัตราการไหลของตะกอนแขวนลอย และ ตะกอนท้องน้ำ พร้อมทั้งคุณสมบัติของตะกอนและคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์การไหลของน้ำ ของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย
- 2) รวบรวมและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอน คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์การไหลของน้ำ และคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุท้องน้ำ โดยศึกษาเปรียบเทียบความเหมาะสมของแนวเหตุผลทางทฤษฎีและวิธีการต่างๆ ที่ได้มีผู้เสนอไว้กับข้อมูลภาคสนาม เพื่อพิจารณาปรับปรุงสมการให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้นในขั้นต่อไป
- 3) ทำการสำรวจภาคสนาม เพื่อเก็บตัวอย่างวัสดุตะกอนท้องน้ำ ของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย
- 4) ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมการ โดยใช้หลักการชลศาสตร์ เพื่อหาสมการที่ใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่เหมาะสมกับแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย

1.4. ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษาสมการที่เหมาะสมสำหรับประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม ของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย มีรายละเอียดของขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

- 1) รวบรวมข้อมูลการสำรวจปริมาณตะกอนแขวนลอย ปริมาณตะกอนท้องน้ำ พร้อมทั้งคุณสมบัติของตะกอนและคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์การไหลของน้ำ ของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งเป็นข้อมูลในอดีตเท่าที่มีปรากฏอยู่
- 2) ศึกษาสมการที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ปริมาณตะกอนรวม ที่มีผู้ได้เสนอไว้
- 3) ทำการสำรวจภาคสนาม เพื่อเก็บตัวอย่างวัสดุตะกอนท้องน้ำ ของแม่น้ำในภาคเหนือ ได้แก่ แม่น้ำปิง วัง ยม น่าน รวมทั้งวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนที่เก็บมา

- 4) คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (Sediment-discharge rating curve) วิธีลอว์เซน (Laursen method) วิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เซน (modified Laursen curve) ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่าน และวิธีลอว์เซนดัดแปลงโดยแมดเดน (Madden's modification of Laursen method)
- 5) เปรียบเทียบผลการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม
- 6) ปรับปรุงสมการที่ใช้คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนของข้อมูลที่มีอยู่ ให้สามารถประเมินได้ดี ด้วยการดัดแปลงสมการของ Laursen ร่วมกับการคำนึงถึงปัจจัยทางด้านอุทกวิทยาที่ส่งผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย
- 7) เปรียบเทียบสมการการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่ได้ปรับปรุงให้เหมาะสมกับข้อมูลการสำรวจที่มี
- 8) สรุปผลการศึกษา
- 9) เขียนรายงานผลการศึกษา

1.5. ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ทราบผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ
- 2) ได้สมการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่ปรับปรุงขึ้น สำหรับใช้ประมาณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม ของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย
- 3) ผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมแหล่งน้ำด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของตะกอนในลำน้ำ

1.6. การศึกษาที่ผ่านมา

1.6.1. การศึกษาภายในประเทศ

อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในประเทศไทยมีอยู่ค่อนข้างน้อย จากการทบทวนรายงานการศึกษาที่เกี่ยวข้อง สรุปได้ดังนี้

1.6.1.1. ไพฑูรย์ กิติสุนทร (2537)

ทำการสำรวจการเคลื่อนที่ของตะกอน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอน กับคุณสมบัติชลศาสตร์การไหลในลำน้ำ ทั้งปริมาณตะกอนแขวนลอยและตะกอนท้องน้ำ รวมทั้งลักษณะตะกอนวัสดุท้องน้ำ (bed material) โดยได้ศึกษาชลศาสตร์การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลำน้ำในแม่น้ำน่านตอนล่างระหว่างสะพานหิน (กม. 478) ถึงปากน้ำโพ (กม. 379) ซึ่งจากการสำรวจการเคลื่อนที่ของตะกอนและสภาพทางชลศาสตร์ลำน้ำ พบว่าแม่น้ำน่านตอนล่างมีลักษณะเป็นแม่น้ำตะกอนทรายที่มีวัสดุท้องน้ำเป็นทรายกลางตลอดช่วงลำน้ำ มีขนาด 0.20-0.48 มิลลิเมตร ซึ่งมีศักยภาพการพัดพาตะกอนท้องน้ำต่ำ ความลาดชันท้องน้ำประมาณ 1:13,000 ความกว้างแม่น้ำประมาณ 120-300 เมตร และมีค่าสัมประสิทธิ์ Manning's n ประมาณ 0.018-0.0325 โดยปริมาณตะกอนแขวนลอยมีความสัมพันธ์ดีกับความเร็วเฉลี่ยและอัตราการไหล ส่วนปริมาณตะกอนท้องน้ำขึ้นอยู่กับความลาดพลังงานการไหล ไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความเร็วเฉลี่ย อัตราการไหล ความเค้นเฉือนบนผิวท้องน้ำ (bed shear stress) และพลังงานกระแสน้ำ (stream power)

เนื่องจากข้อมูลการสำรวจตะกอนท้องน้ำของแม่น้ำน่านมีค่อนข้างจำกัด จึงอาศัยการทดสอบความเหมาะสมของวิธีการคำนวณ มาทดสอบหาวิธีการที่เหมาะสมที่จะใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ HEC-6 สำหรับประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมในแม่น้ำน่านตอนล่าง โดยใช้ค่าผลรวมความแตกต่างกำลังสอง (sum of square of difference) เป็นเกณฑ์การตัดสิน จากวิธีการคำนวณที่มีทั้งสิ้น 10 วิธี ได้แก่ a. Toffaleti's (1969) Relationship b. Madden's (1963) modification (unpublished) of Laursen's (1958) Relationship c. Yang's Stream Power for Sands Relation (1972) d. Duboys (Brown, 1950) e. Ackers-White (1973) f. Colby (1964) g. Meyer-Peter and Müller (1948) h. Toffaleti (1969) and Schoklitsch (1930) i. A combination of Toffaleti (1969) and Meyer-Peter and Müller (1948) และ j. Madden's (1985) modification (unpublished) of Laursen's (1958) Relationship พบว่า วิธีการของ Meyer-Peter and Müller มีค่าเฉลี่ยของผลรวมความแตกต่างกำลังสองน้อยที่สุด และสรุปว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนของชุดข้อมูลนี้

1.6.1.2. เสรี จันทโรยธา และ ชัชวาลย์ ทักษอุดม (2538)

ทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงสภาพลำน้ำแม่กกช่วง อ.เมือง จ.เชียงราย ในการศึกษานี้ได้สำรวจสภาพรูปตัดลำน้ำ และตรวจวัดปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอย รวมทั้งข้อมูลการกระจายของขนาดเม็ดวัสดุท้องน้ำ เพื่อหาปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (total sediment load) ที่จะนำไปใช้ศึกษการเปลี่ยนแปลงของลำน้ำแม่กก จังหวัดเชียงราย ในโครงการจัดทำแผนหลักการอนุรักษ์ และพัฒนาสิ่งแวดล้อม แม่น้ำกก จังหวัดเชียงราย ผลการสำรวจพบว่า วัสดุลำน้ำของแม่น้ำกกแปรผันตั้งแต่ทรายละเอียดไปจนถึงกรวดขนาดกลาง มีค่ามัธยฐานของเม็ดวัสดุ (d_{50}) 0.95 มม. จากการวิเคราะห์สภาพทางชลศาสตร์ พบว่า แม่น้ำกกมีค่าหน่วยแรงเฉือนที่ท้องน้ำ (tractive force) เฉลี่ย 1.0-2.5 กก./ม.² มากกว่า ค่าหน่วยแรงเฉือนท้องน้ำวิกฤตซึ่งประมาณค่าได้ 0.17-0.25 กก./ม.² ซึ่งบ่งชี้ถึงสภาพการกัดเซาะได้อย่างชัดเจน ผลการสำรวจภาคสนามคำนวณได้ปริมาณตะกอนท้องน้ำเป็นสัดส่วนร้อยละ 50.7 ถึง 54.5 ของปริมาณตะกอนแขวนลอย (ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2537)

1.6.1.3. นริสา หลีกกาญจนะ (2546)

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยรายปีในแม่น้ำกับปัจจัยต่าง ๆ ทางด้านน้ำฝน น้ำท่า และคุณลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำ ได้แก่ ขนาดของพื้นที่ ความชันลำน้ำ ความยาวของลำน้ำหลักจากจุดออกถึงขอบเขตบนของพื้นที่ลุ่มน้ำ ความยาวของลำน้ำหลักจากจุดออกถึงจุดใกล้ศูนย์ถ่วงพื้นที่ และเปอร์เซ็นต์ของการใช้ที่ดิน 5 ประเภท คือ เกษตรกรรม ป่าไม้ ที่อยู่อาศัย แหล่งน้ำ และพื้นที่อื่น ๆ โดยทำการศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำในภาคเหนือ (ปิง วัง ยม และน่าน) และลุ่มน้ำในภาคใต้ ด้วยวิธีสหสัมพันธ์ถดถอย โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

ผลการศึกษาแบ่งออกเป็นความสัมพันธ์รายพื้นที่ลุ่มน้ำ และรายพื้นที่ภูมิภาค โดยรายพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นการศึกษาโดยใช้ชลภาพและกราฟความสัมพันธ์รายเดือนระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับปริมาณน้ำฝนและน้ำท่า พบว่า ปริมาณน้ำท่าเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนแขวนลอยรายเดือนมากที่สุด ส่วนการศึกษาแบบรายพื้นที่ภูมิภาคใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยรายปีกับปัจจัย 3 กลุ่มเรียงตามลำดับความสำคัญที่มีต่อปริมาณตะกอนแขวนลอยคือ 1) ปริมาณน้ำท่า หรือน้ำฝน 2) คุณลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำ 3) เปอร์เซ็นต์การใช้ที่ดินประเภทต่าง ๆ ทั้งนี้สมการความสัมพันธ์ของภาคเหนือให้ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.765-0.822 และคำนวณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยได้สูงกว่าค่าจริง โดยมีความแตกต่างเฉลี่ยอยู่ในช่วง 51-67%

1.6.1.4. นฤนารถ มีบุญมาก (2547)

ทำการทดสอบหาสมการที่สามารถคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำได้เหมาะสมกับลักษณะลุ่มน้ำทางภาคเหนือของประเทศไทย โดยใช้ลุ่มน้ำวังเป็นตัวแทนของลุ่มน้ำทางภาคเหนือ การศึกษาได้เก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำในเดือน ก.ค. 2543 ถึง ก.ค. 2545 จาก 2 สถานี คือ W.16 (แม่น้ำวัง) และ W.17 (แม่น้ำสวณ) มาคำนวณหาปริมาณตะกอนท้องน้ำ อาศัยสมการประเมินปริมาณตะกอนท้องน้ำ 5 สมการ คือ สมการของ เคซี (Casey) ไอส์ไตน์ (Einstein) คาร์ลินสกี (Kalinske) ชอร์คิสต์ (Schokitch) และชีลด์ (Shield) แล้วเปรียบเทียบกับความจุของอ่างเก็บน้ำที่มีผลลง ซึ่งหมายถึงปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นในอ่างเก็บน้ำ พบว่า สมการของ Shield ให้ผลคำนวณดีที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อน 3.33% เมื่อพิจารณาสัดส่วนของผลการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำต่อปริมาณตะกอนแขวนลอย พบว่า ผลการคำนวณจากสมการของ Casey และ Schokitch มีค่าไม่เกิน 2% ส่วนผลการคำนวณจากสมการของ Kalinske Shield และ Einstein มีค่าอยู่ในช่วง 3000% ถึง 6000%

1.6.1.5. Ziegler et al. (2014)

ศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำของลุ่มน้ำแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีพื้นที่ลุ่มน้ำรวม 74 ตารางกิโลเมตร ช่วงความกว้างทางน้ำ 6 ถึง 8 เมตร ช่วงอัตราการไหลของน้ำ 0.4 ถึง 4.5 ลบ.ม./วินาที โดยทำการเก็บตัวอย่างของตะกอนท้องน้ำ 136 ตัวอย่าง ในช่วงเดือน ก.ค. ถึง ก.ย. 2548 ลักษณะของตะกอนท้องน้ำที่พบมักเป็นตะกอนทราย ส่วนใหญ่มีขนาดเฉลี่ยของตะกอนในช่วง 0.25 ถึง 1 มิลลิเมตร มีอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 1.14 กิโลกรัม/วินาที ส่วนอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 39 กิโลกรัม/วินาที หรือเทียบเท่าความเข้มข้นของปริมาณตะกอนแขวนลอยในช่วงค่า 20 ถึง 14,000 มิลลิกรัม/ลิตร

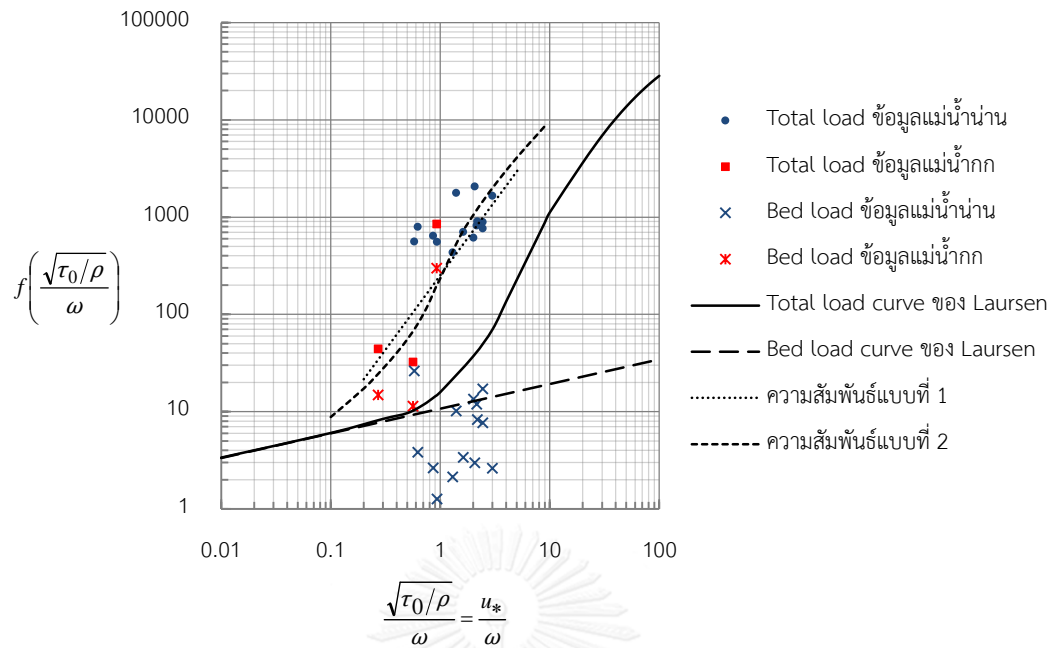
เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (Q_b) กับอัตราไหลของน้ำ (Q) ได้สมการ คือ $Q_{bi} = 0.02Q_i^{2.47}$ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.73 พร้อมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยด้วยโค้งความสัมพันธ์ (rating curves) พบว่า มีปริมาณตะกอนท้องน้ำคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 9 ถึง 25 ของปริมาณตะกอนแขวนลอย ซึ่งได้สรุปค่าประมาณที่ดีที่สุดว่า อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำรายปี (total annual sediment load) คิดเป็นร้อยละ 18 ของอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมรายปี (total annual sediment load)

1.6.1.6. รัตนา รัตนจารุรักษ์ และ ลำภูมิตี เทียบชัยภูมิ (2558)

ทำการศึกษ ปริมาณตะกอนท้องน้ำช่วงฤดูน้ำหลากในแม่น้ำลำพระเพลิง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา จากข้อมูลการสำรวจ 13 ครั้ง ระหว่างเดือนมิถุนายน-เดือนตุลาคม พ.ศ.2556 โดยทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณตะกอนท้องน้ำแบบถดถอยเชิงเดียวกับปริมาณน้ำท่า และปริมาณตะกอนแขวนลอย พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน อาจเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำมีปัจจัยแปรผันที่เกี่ยวข้องหลายด้าน และลักษณะท้องน้ำหรือหน้าตัดลำน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และเมื่อพิจารณารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนร้อยละของปริมาณตะกอนท้องน้ำต่อปริมาณตะกอนแขวนลอยกับความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำ พบว่า น้ำที่มีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยสูง จะมีสัดส่วนของปริมาณตะกอนท้องน้ำต่ำ และในทางตรงข้าม หากมีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยต่ำ จะมีสัดส่วนของตะกอนท้องน้ำสูง และค่ามีการกระจายตัวมาก ซึ่งสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของปริมาณตะกอนท้องน้ำต่อปริมาณแขวนลอย (R) กับความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (C) ในหน่วย ppm ได้ คือ $R = 398.59C^{1.075}$

1.6.1.7. กนกพร เลิศเดชาภัทร และคณะ (2558)

ศึกษาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย ข้อมูลที่นำมาใช้ศึกษาประกอบด้วย 14 ชุดข้อมูลการสำรวจตะกอนรวมแม่น้ำน่านเมื่อปี 2535 ของไพฑูริย์ (2537) และอีก 3 ชุดข้อมูลการสำรวจตะกอนรวมแม่น้ำกกเมื่อปี 2537 ของเสรี จันทรโยธา และ ชัชวาลย์ ทักษอุดม (2538) ในการศึกษาได้ดัดแปลงสมการ Laursen (1958) เพื่อหาสมการที่สามารถนำมาใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทยได้ แสดงค่าฟังก์ชันของ Laursen ที่ดัดแปลงได้ดังรูปที่ 1-1 ซึ่งคำนวณโดยใช้ขนาดมัธยฐานของตะกอนวัสดุท้องน้ำ (d_{50}) เพียงขนาดเดียว มาเป็นตัวแทนของวัสดุท้องน้ำทั้งหมดในแต่ละชุดข้อมูล โดยไม่ได้แยกพิจารณาแต่ละสัดส่วนขนาดวัสดุท้องน้ำ ผลการคำนวณพบว่า การสำรวจอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่วัดจริงในสนามได้ค่าสูงกว่าผลคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่คำนวณด้วยสมการของ Laursen และเมื่อเปรียบเทียบผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้จากสมการ Laursen ที่ดัดแปลงขึ้น กับ ข้อมูลจากการสำรวจจริง พบว่ามีความคลาดเคลื่อน (SSE) ประมาณร้อยละ 30 และเส้นความสัมพันธ์ทั้ง 2 แบบที่ดัดแปลงนี้ก็ได้ให้ค่าที่ต่างกันมากนัก

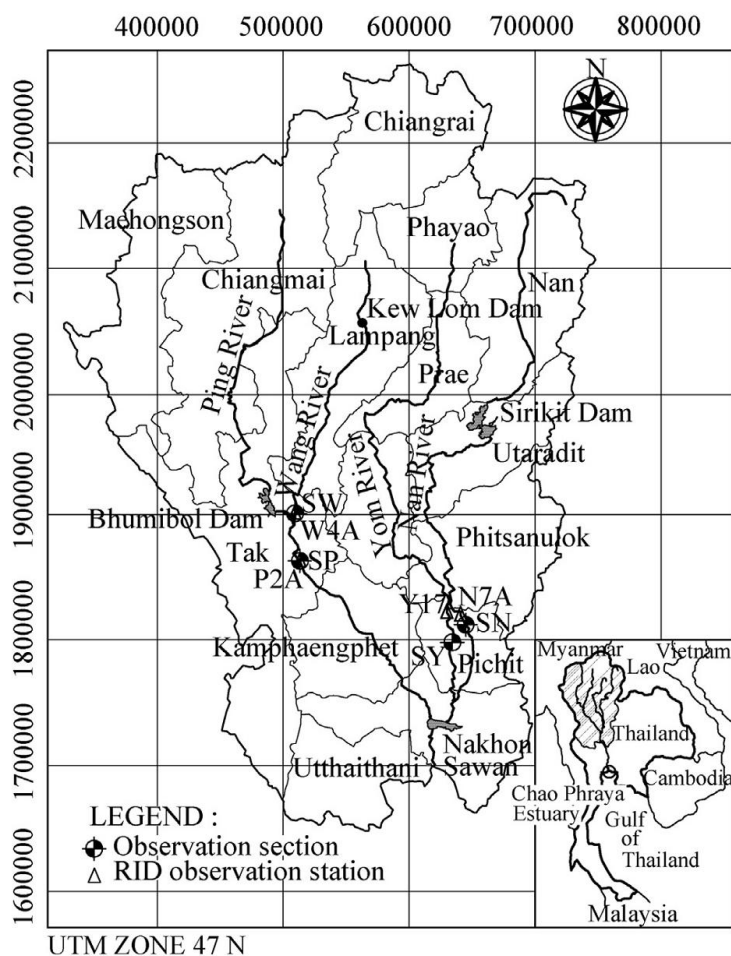


รูปที่ 1-1 ผลการดัดแปลงโค้งของ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านและแม่น้ำกก
(กนกพร เลิศเดชาวัชร และคณะ, 2558)

1.6.1.8. Bidorn et al. (2015)

ศึกษาผลกระทบของการเกิดน้ำท่วมใหญ่ปี 2554 ที่มีผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนของแม่น้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน คือ แม่น้ำปิง แม่น้ำวัง แม่น้ำยม และแม่น้ำน่าน โดยเฉพาะในช่วงเดือน ก.ค.-ส.ค. 2554 ซึ่งขณะนั้นภาคเหนือของประเทศไทยมีปริมาณฝนสูงกว่าค่าเฉลี่ยถึง 150% และในช่วงที่เกิดน้ำท่วมสำรวจค่าอัตราไหลได้สูงกว่าค่าเฉลี่ยถึง 1.4-5 เท่า ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีการสำรวจทั้งข้อมูลหน้าตัดลำน้ำ ความเร็วการไหล ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (suspended sediment concentration) และปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำของแต่ละแม่น้ำ

ผลการศึกษาวัสดุตะกอนท้องน้ำ (bed material) ในปี 2554 ของแม่น้ำปิง (สถานี P.2A) แม่น้ำวัง (สถานี W.4A) และ แม่น้ำยม (สถานี Y.17) พบว่า ส่วนใหญ่เป็นตะกอนทรายขนาดหยาบมาก (very coarse sand) มีขนาดเฉลี่ย (d_{50}) เป็น 1.13, 1.02 และ 1.54 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนแม่น้ำน่าน (สถานี N.7A) ส่วนใหญ่เป็นทรายกลาง (medium sand) มีขนาดเฉลี่ย (d_{50}) 0.39 มิลลิเมตร แสดงพื้นที่ศึกษาและตำแหน่งสถานีวัดน้ำดังรูปที่ 1-2



รูปที่ 1-2 พื้นที่ศึกษาและตำแหน่งสถานีวัดน้ำของ Bidorn et al. (2015)

ในช่วงที่เกิดเหตุการณ์น้ำหลากเมื่อปี 2554 ได้ทำการสำรวจภาคสนามเมื่อวันที่ 17-21 ต.ค. 2554 และอีก 1 ปีให้หลัง คือช่วงวันที่ 15-20 ต.ค. 2555 โดยเปรียบเทียบอัตราการไหลและอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในช่วงปี 2554, 2555 และ ค่าเฉลี่ย 60 ปี (2495-2555) พบว่าในช่วงที่น้ำท่วม แม่น้ำมีอัตราไหลสูงกว่าค่าเฉลี่ยถึง 1.4-5 เท่า และมีอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมอยู่ในช่วง 0.3-1.6 ล้านตัน กลุ่มแม่น้ำน่านและกลุ่มแม่น้ำวังมีปริมาณตะกอนต่อหน่วยพื้นที่ที่สูงกว่ากลุ่มแม่น้ำปิง และกลุ่มแม่น้ำยมอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมต่อหน่วยอัตราไหล (S_T/Q) ที่ทำการสำรวจในปี 2555 พบว่ามีค่ากระจายเป็นช่วงกว้างตั้งแต่ 4.6-10.0 ตัน/วัน/ลูกบาศก์เมตร/วินาที ทั้งนี้ จากเหตุการณ์น้ำท่วมเมื่อปี 2554 พบว่า อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมต่อหนึ่งหน่วยอัตราไหล (S_T/Q) ของแม่น้ำปิงและแม่น้ำวังจะมีค่าสูงมากเป็น 26.0 และ 29.9 ตัน/วัน/ลูกบาศก์เมตร/วินาที ตามลำดับ ในขณะที่แม่น้ำยมและแม่น้ำน่านไม่ได้มีความแตกต่างของค่าในช่วงเหตุการณ์น้ำท่วมและ 1 ปีหลังจากเหตุการณ์น้ำท่วมมากนัก

จากเหตุการณ์น้ำท่วมปี 2554 ส่งผลถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของตะกอนในแต่ละแม่น้ำ โดยสัดส่วนปริมาณตะกอนท้องน้ำต่อปริมาณตะกอนแขวนลอยของแม่น้ำปิง วัง และยม อยู่ในช่วง 4-6 % ส่วนแม่น้ำน่านซึ่งมีวัสดุท้องน้ำเป็นตะกอนทรายขนาดกลางมีสัดส่วนปริมาณตะกอนท้องน้ำต่อปริมาณตะกอนแขวนลอย ประมาณ 14% และในช่วง 1 ปีให้หลังซึ่งเป็นการไหลตามฤดูกาลปกติ พบสัดส่วนปริมาณตะกอนท้องน้ำต่อปริมาณตะกอนแขวนลอย ในช่วงตั้งแต่ 0-26% โดยเป็นผลมาจากสภาพการไหล ลักษณะตะกอน สภาพภูมิประเทศลุ่มน้ำ ขนาดและตำแหน่งของอ่างเก็บน้ำ รวมถึงสภาพทางอุทกวิทยาเช่น ความเข้มข้น และช่วงเวลาที่เกิดฝน เป็นต้น

1.6.2. การศึกษาในต่างประเทศ

1.6.2.1. Lane and Borland (1951)

E. W. Lane และ W. M. Borland ได้เสนอแนวทางการประมาณปริมาณตะกอนท้องน้ำไว้ว่า โดยทั่วไปปริมาณตะกอนท้องน้ำจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับปริมาณตะกอนแขวนลอย โดยใช้ดุลยพินิจของวิศวกรในการพิจารณาค่าที่เป็นไปได้และสมมติเปอร์เซ็นต์ที่ใช้ในลำน้ำต่าง ๆ กัน มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ มีการทำสำรวจปริมาณตะกอนรวม สำหรับใช้เสนอแนวทางการประมาณปริมาณตะกอนท้องน้ำให้แม่นยำ ทั้งนี้ สิ่งที่ต้องคำนึงไว้อยู่เสมอคือ ในการประมาณค่าจะมีขีดจำกัดของความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดที่สามารถทำได้ โดยปัจจัยหลัก 3 อย่างที่ส่งผลกับปริมาณตะกอนท้องน้ำที่เกิดขึ้นได้ในลำน้ำ คือ

- 1) ขนาดของวัสดุตะกอนท้องน้ำ (size of bed material) หรือ ความเร็วการตกของอนุภาค (fall velocity)
- 2) ความชันของลำน้ำ หรือความเร็วเฉลี่ยของลำน้ำ
- 3) ธรรมชาติของทางน้ำ รวมทั้ง ความลึกน้ำ ขนาดลำน้ำ รูปร่างลำน้ำ และความขรุขระของพื้นท้องน้ำและตลิ่ง

ส่วนปัจจัยรองที่ส่งผลเล็กน้อยคือ อุณหภูมิน้ำ รวมถึงผลจากการเป็นน้ำแข็ง สำหรับการประเมินผลกระทบต่อปริมาณตะกอนท้องน้ำที่เกิดจากปัจจัยข้างต้น มีหลักเกณฑ์ดังแสดงต่อไปนี้

ข้อที่ 1 ยังมีปริมาณความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำน้อยเท่าใด จะมีเปอร์เซ็นต์ของปริมาณตะกอนท้องน้ำสูงเท่านั้น ซึ่งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการประมาณปริมาณตะกอนท้องน้ำ

ข้อที่ 2 ขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำยิ่งใกล้เคียงกับขนาดของตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำมากเท่าใด จะยังมีเปอร์เซ็นต์ของปริมาณตะกอนท้องน้ำคิดเทียบจากปริมาณตะกอนรวมที่สูงเท่านั้น

ข้อที่ 3 เมื่อมีน้ำอยู่ที่ความลึกระดับต่ำ ๆ หรือ กลาง ๆ สัดส่วนของปริมาณตะกอนท้องน้ำต่อปริมาณตะกอนแขวนลอย มักจะมีค่ามากกว่าขณะที่ความลึกน้ำอยู่ระดับสูง ดังนั้น ลำน้ำที่มีอัตราไหลไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จะมีเปอร์เซ็นต์ของปริมาณตะกอนท้องน้ำที่สูงกว่า โดยหลักเกณฑ์นี้ไม่สามารถใช้กับลำน้ำที่ไหลตามแนวเขาสูงชันได้ เพราะเมื่อเกิดน้ำหลากจะมีการเคลื่อนตัวของก้อนหินขนาดใหญ่ ซึ่งในกรณีนี้สัดส่วนของปริมาณตะกอนท้องน้ำที่มีจะมากขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของอัตราไหล

ข้อที่ 4 ลำน้ำที่ตื้นและกว้างจะมีตะกอนท้องน้ำในสัดส่วนที่สูงกว่า ลำน้ำที่ลึกและแคบ

ข้อที่ 5 ทางน้ำที่มีการไหลแบบปั่นป่วน มีแนวโน้มที่จะมีปริมาณตะกอนท้องน้ำน้อย

1.6.2.2. Laursen (1958)

Laursen พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอยที่มีความเกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ จากข้อมูลสมภาวะการไหล (ความเร็วเฉลี่ย ความลึก และความลาดชัน) และข้อมูลลักษณะตะกอน (ขนาดเฉลี่ย การกระจายความถี่ ความถ่วงจำเพาะ และรูปร่างตะกอน) ที่ได้จากการทดลองสำหรับช่วงขนาดตะกอนเฉลี่ย (d_m) 0.088-4.08 มิลลิเมตร ที่ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 โดยเขามีแนวคิดที่ว่าถ้าลักษณะทางชลศาสตร์และลักษณะของตะกอนสามารถอธิบายได้ด้วยค่าพารามิเตอร์ อย่างน้อยความสัมพันธ์จากสูตรเอมพิริคัลจึงน่าจะอธิบายอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนได้ พารามิเตอร์หนึ่ง que แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนคือค่าสัดส่วนความเร็วเฉือน กับความเร็วการตกของเม็ดตะกอน (the shear velocity/fall velocity, $\sqrt{\tau_0/\rho}/\omega$) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อผลการคำนวณปริมาณตะกอนแขวนลอย

ความเข้าใจในเรื่องของแรงที่ทำให้อนุภาคตะกอนเคลื่อนที่ได้ในรูปของตะกอนท้องน้ำ มีความสัมพันธ์กับแรงดูด (tractive force) และแรงต้านการเคลื่อนที่ในรูปของแรงเฉือนวิกฤต (critical tractive force) ที่ตะกอนจะเริ่มเคลื่อนที่ได้ ทั้งนี้สามารถพิจารณาแรงดูดโดยรวมได้เฉพาะในกรณีของท้องน้ำราบเรียบ (plane bed) หากท้องน้ำเป็นเนิน (dune) ค่าแรงดูดโดยรวมส่วนหนึ่งจะไม่สามารถนำมาพิจารณาการเคลื่อนที่ของตะกอนได้ เพราะไม่ได้ทำให้ตะกอนเคลื่อนที่ ทั้งนี้ สามารถประมาณค่าแรงดูด (tractive force) ได้ด้วยสมการของ Manning กับ ค่า n ของ Strickler ซึ่งเป็นฟังก์ชันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตะกอน สรุปได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\tau'_0 = \frac{V^2 d^{1/3}}{30y_0^{1/3}} \quad (1.1)$$

ส่วนค่าแรงเฉือนวิกฤต (critical tractive force) ประมาณได้ด้วยสมการ $\tau_c = Cd$ เมื่อ C คือค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นกับลักษณะตะกอนและสภาพการไหลใกล้ชั้นขอบเขต จากข้อมูลการทดลองที่มี Laursen ใช้ค่า C เท่ากับ 4 กับทุกชุดข้อมูล ยกเว้นชุดข้อมูลของ Toch และ Hsia ซึ่งใช้ C เท่ากับ 8 และ 16 ตามลำดับ สรุปข้อมูลที่ใช้พิจารณาในตารางที่ 1-1 นอกจากนี้ ทั้ง τ'_0 และ τ_c ยังเป็นตัวแทนของแรงเฉือนเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ท้องน้ำ ได้ดีกว่าแรงที่ทำให้ตะกอนเกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งไม่ว่า τ'_0 และ τ_c จะคำนวณมาด้วยวิธีใด แต่ละวิธีก็ให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน ดังนั้น สัดส่วน τ'_0/τ_c สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่อธิบายอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำได้

พารามิเตอร์ที่สาม คือ สัดส่วนความเร็วของอนุภาคตะกอนท้องน้ำที่เคลื่อนที่ ต่อ ความเร็วการตกของเม็ดตะกอน สัดส่วนนี้ส่งผลกับปริมาณตะกอนแขวนลอยมากกว่าที่จะส่งผลต่อปริมาณตะกอนท้องน้ำ โดย Laursen ได้แสดงให้เห็นว่า

$$\frac{\sqrt{\tau'_0/\rho} d}{V y_0} \propto \left(\frac{d}{y_0}\right)^{7/6} \quad (1.2)$$

และสรุปสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\bar{C}}{\left(\frac{d}{y_0}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right)} = f\left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}\right) \quad (1.3)$$

ค่าความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 1-3 โดยเส้นทึบใช้ในการคำนวณปริมาณตะกอนทั้งหมด และเส้นประใช้ในการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำ

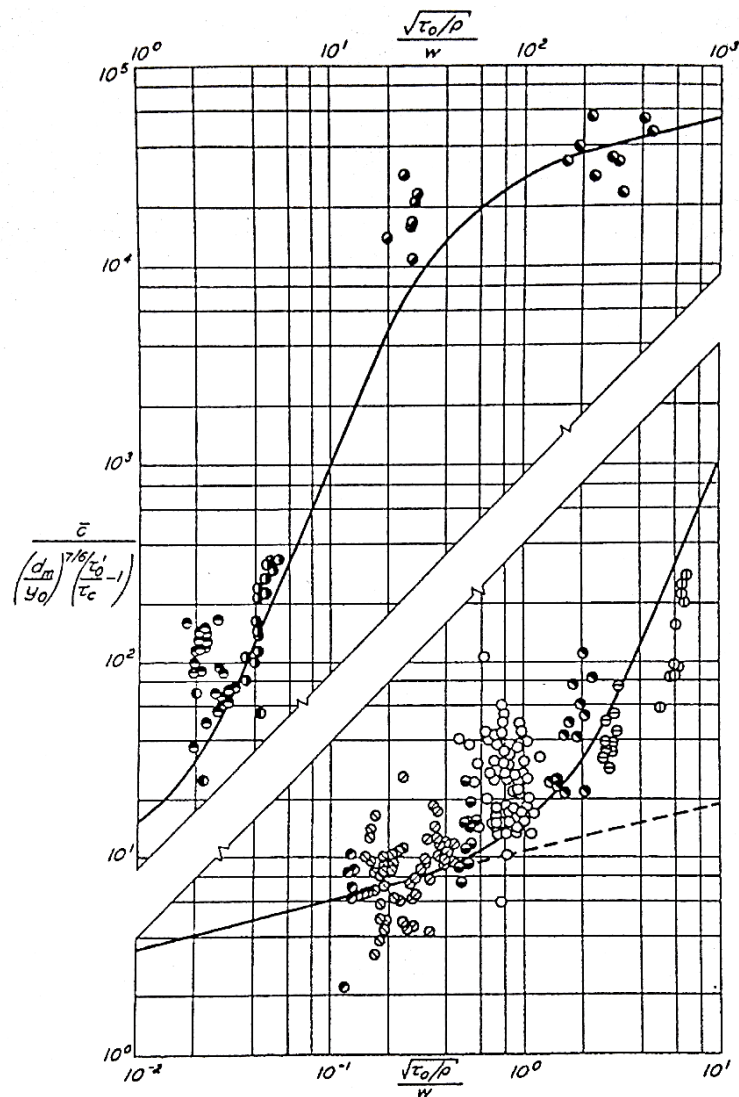
หากพิจารณาแต่ละขนาดของวัสดุตะกอนท้องน้ำ (bed material) สามารถคำนวณหาผลรวมความเข้มข้นโดยเฉลี่ยได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\bar{C} = \sum p \left(\frac{d}{y_0}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right) f\left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}\right) \quad (1.4)$$

เมื่อ p คือ สัดส่วนของตะกอนขนาด d สำหรับค่า τ_c และ ω คำนวณจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตะกอนขนาด d ของสัดส่วนขนาดตะกอนนั้น ๆ ส่วนค่า τ'_0 และ $\sqrt{\tau_0/\rho}$ มีค่าเดียวกันในทุกสัดส่วนตะกอน โดย τ'_0 คำนวณด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (mean diameter) ของตะกอนทั้งหมดที่มีในชุดตัวอย่างเดียวกัน

ตารางที่ 1-1 สรุปข้อมูลจากการทดลอง ที่ Laursen (1958) ใช้พิจารณาหาความสัมพันธ์

ผู้สำรวจ	สัญลักษณ์	d_m (mm)	\bar{c}	$\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}$	τ'_0/τ_c	ประเภท ตะกอน
Lin, Rand (Table I)	●	0.11	0.014 – 0.52	3.6 – 5.4	2.77 – 23.8	แขวนลอย
Toch (Table II)	●	0.04	0.73 – 9.99	20.2 – 28.4	1.96 – 11.3	รวม
Hsia	●	0.011	0.64 – 11.1	168 – 451	1.89 – 18.0	รวม
Pien	●	0.18	0.013 – 0.24	2.0 – 4.3	4.0 – 10.9	แขวนลอย
MacDougall	●	1.44	0.012 – 0.13	0.15 – 0.22	1.11 – 2.43	ท้องน้ำ
	●	0.66	0.018 – 0.12	0.23 – 0.43	1.17 – 2.99	ท้องน้ำ
O'Brien	○	0.37	0.001 – 0.13	0.43 – 1.21	1.11 – 2.43	ท้องน้ำ
Brooks	●	0.088	0.019 – 0.53	5.0 – 6.9	2.01 – 14.0	รวม
	●	0.145	0.020 – 0.24	2.5 – 3.1	1.86 – 9.5	รวม
Lin, Barton	●	0.18	0.003 – 0.37	1.8 – 3.1	1.45 – 19.3	รวม
WES	●	0.20	0.004 – 0.08	1.4 – 2.2	1.26 – 8.2	รวม
	●	0.50	0.006 – 0.05	0.46 – 0.57	1.30 – 2.91	ท้องน้ำ
	●	4.08	0.002 – 0.03	0.12 – 0.15	1.02 – 1.20	ท้องน้ำ

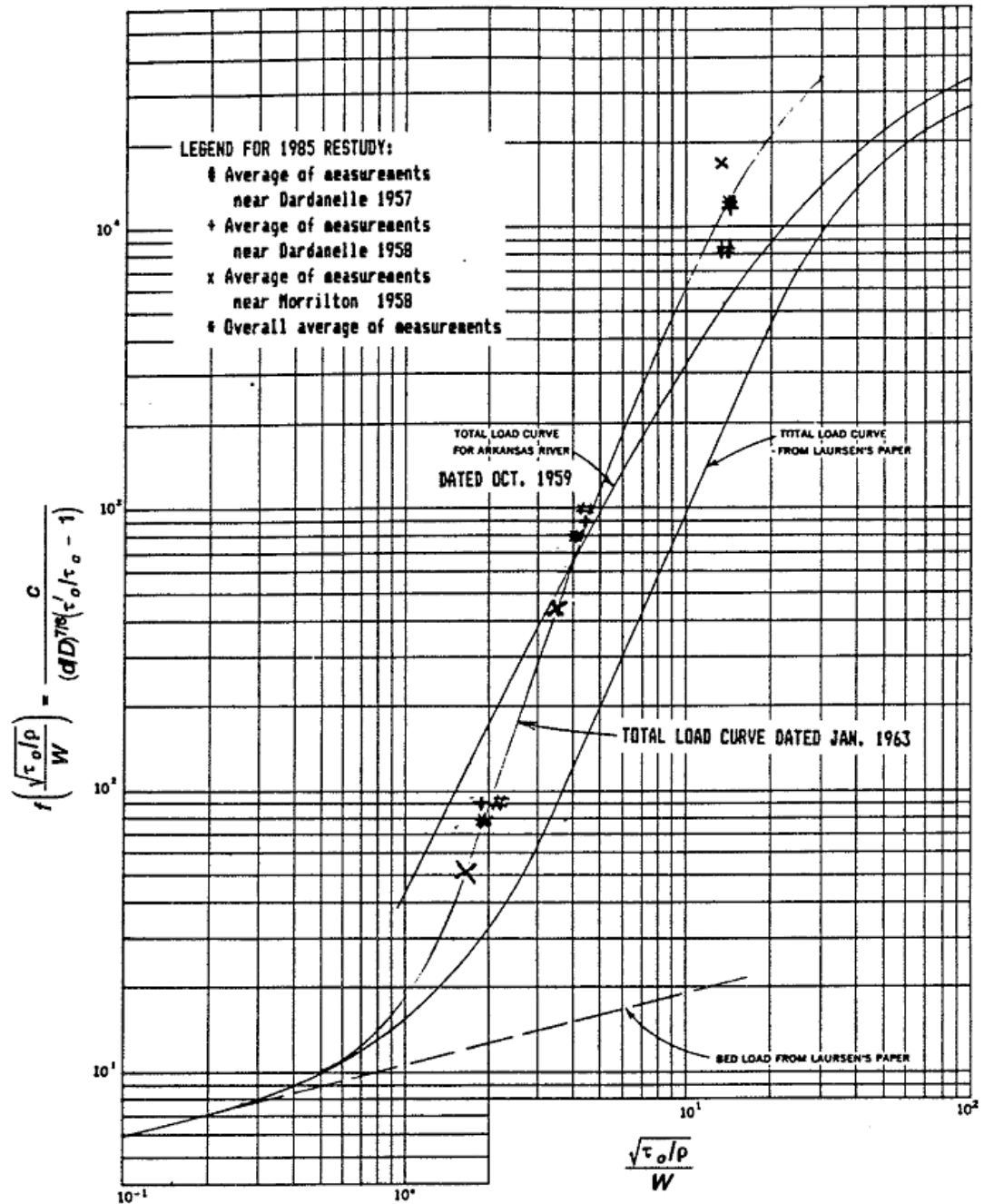


รูปที่ 1-3 ความสัมพันธ์ของ Laursen ระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มข้นกับสภาพทางชลศาสตร์และลักษณะของตะกอน (Laursen, 1958)

1.6.2.3. Madden (1985)

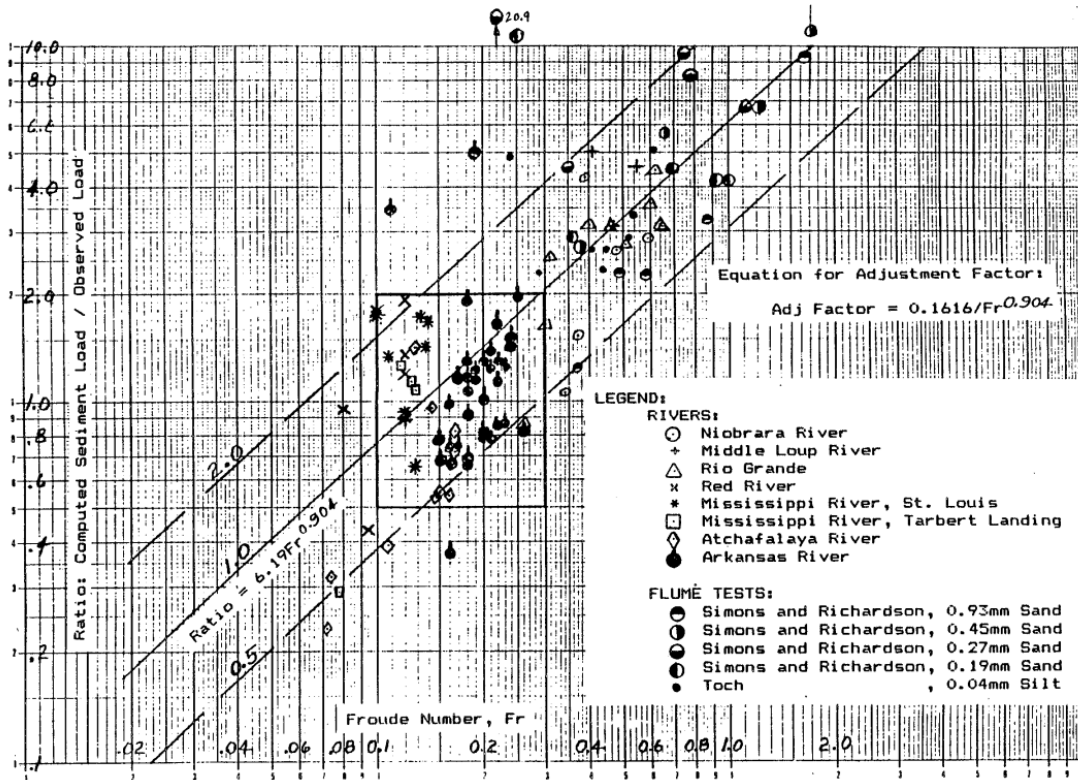
Madden (1985) นำข้อมูลของแม่น้ำอาร์คันซอ (Arkansas) มาใช้ปรับปรุงสมการของ Laursen (1958) โดยพิจารณาแต่ละสัดส่วนของขนาดตะกอนท้องน้ำที่มี ข้อมูลการสำรวจมีทั้งสิ้น 3 ชุดข้อมูล โดย 2 ชุดข้อมูลแรกเก็บบริเวณ Dardanelle ในเดือน มิ.ย. และ ก.ค. 1957 และ เดือน เม.ย. 1958 ส่วนชุดข้อมูลท้ายสุดเก็บบริเวณ Morrilton ในเดือนเม.ย. 1958 และใช้ชุดข้อมูลของแม่น้ำมิสซูรี (Missouri) ที่เก็บโดย Bondurant (1958) มาตรวจสอบโค้งความชันที่ได้จากการ

วิเคราะห์ข้อมูลแม่น้ำอาร์คันซอ ผลวิเคราะห์พบว่า โค้งที่ดีที่สุดค่อนข้างขนานกับเส้นเดิมของ Laursen ซึ่งก็คือเส้น total load curve dated Jan, 1963 ที่แสดงในรูปที่ 1-4



รูปที่ 1-4 กราฟความสัมพันธ์ของ Madden เปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ของ Laursen (Madden, 1993)

Madden วิเคราะห์แฟคเตอร์สำหรับปรับค่า (Adjustment factor) โดยการหาสัดส่วนของปริมาณตะกอนแขวนลอยที่คำนวณได้ กับ ค่าที่ได้จากการสำรวจ พบว่ามีความสัมพันธ์กับเลขฟรูด แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 1-5



รูปที่ 1-5 การดัดแปลงสมการของ Laursen โดย Madden (Madden, 1993)

สำหรับสมการของ Madden ที่ปรับปรุงสมการของ Laursen คือ

$$C_t = \sum_i P_b \left(\frac{d_i}{d}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_{ci}} - 1\right) f\left(\frac{u_*}{\omega_i}\right) \left(\frac{0.1616}{Fr^{0.904}}\right) \quad (1.5)$$

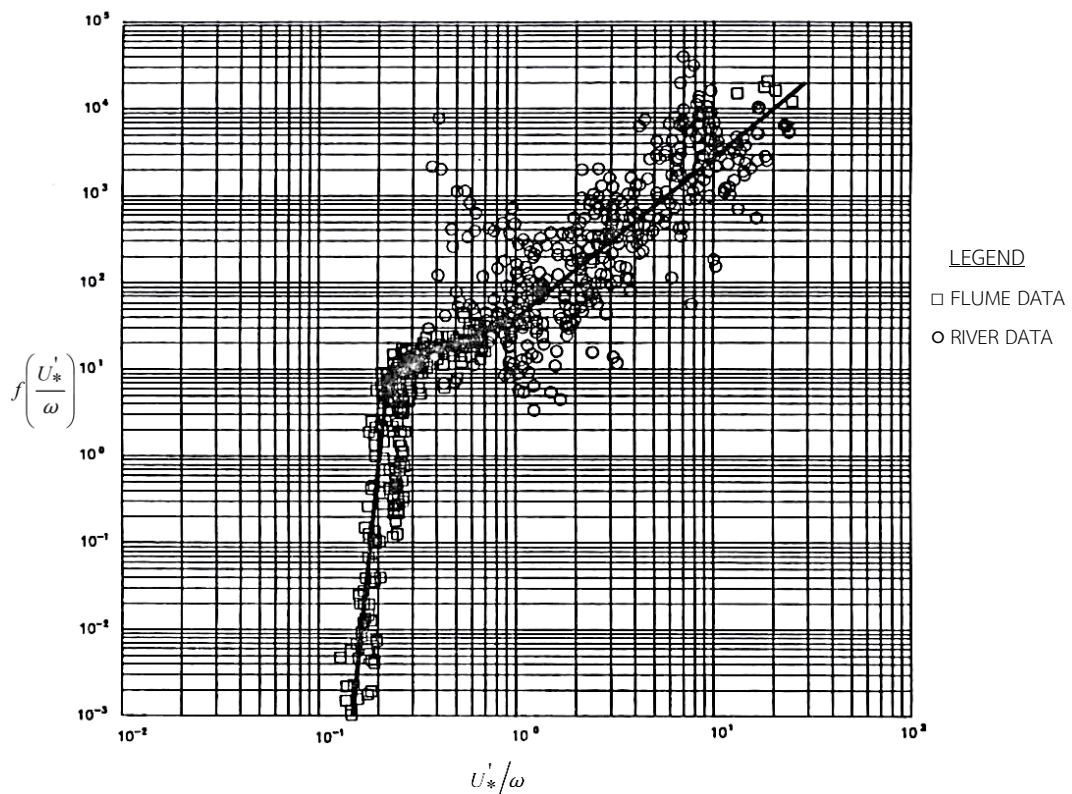
ทั้งนี้ Madden ใช้เส้นฟังก์ชันการคำนวณตะกอนที่น้ำเต็มของ Laursen ในการหาค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนที่น้ำ โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการคำนวณ ดังนี้

$$f\left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}\right)_b = 10.7378 \left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}\right)^{0.25301} \quad (1.6)$$

1.6.2.4. Copeland and Thomas (1989)

Copeland และ Thomas ได้ปรับปรุงสมการ Laursen เพื่อใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนของลำน้ำคอร์เตมาเดรา (Corte Madera Creek) ในเมืองมาริน เคาน์ตี (Marin County) รัฐแคลิฟอร์เนีย (California) ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเรียกชื่อสมการที่ใช้คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนนี้ว่า “SEDTRAN” ความสัมพันธ์ที่ได้นี้ถูกพัฒนาด้วยข้อมูลภาคสนามและข้อมูลจากรางทดลอง ซึ่งมีขนาดวัสดุท้องน้ำอยู่ในช่วงของทรายและกรวด ได้ค่าความสัมพันธ์ตามรูปที่ 1-6 สำหรับใช้ในสมการคำนวณ คือ

$$C = 0.01\gamma_w \sum_i P_i \left(\frac{D_i}{y}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_{ci}} - 1\right) f\left(\frac{U'_*}{\omega_i}\right) \quad (1.7)$$



รูปที่ 1-6 ค่า $f\left(\frac{U'_*}{\omega}\right)$ สำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Copeland และ Thomas

(Copeland and Thomas, 1989)

เมื่อ

U'_* = ความเร็วเฉือนของอนุภาค

ω_i = ความเร็วการตกอิสระ

$f\left(\frac{U'_*}{\omega_i}\right)$ = ค่าฟังก์ชัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 1-6

C	=	ความเข้มข้นในหน่วยน้ำหนักต่อปริมาตร
P_i	=	สัดส่วนของวัสดุท้องน้ำแต่ละขนาด
y	=	ความลึกน้ำ
τ'_0	=	แรงเฉือนของวัสดุท้องน้ำ

โดย Copeland and Thomas ระบุว่า สมการนี้พัฒนาโดยใช้ช่วงข้อมูลที่กว้างกว่า และมีความถูกต้องทางทฤษฎีมากกว่าสมการเดิมของ Laursen ข้อดีหลัก ๆ ของสมการนี้ คือ สามารถประเมินปริมาณการเคลื่อนที่ของกรวดขนาดหยาบได้ดีกว่าสมการอื่น แต่อย่างไรก็ตาม สมการนี้จะประเมินว่าไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนที่เป็นกรวดขนาดใหญ่กว่า 16 มิลลิเมตร

1.6.2.5. Kodoatie (1999)

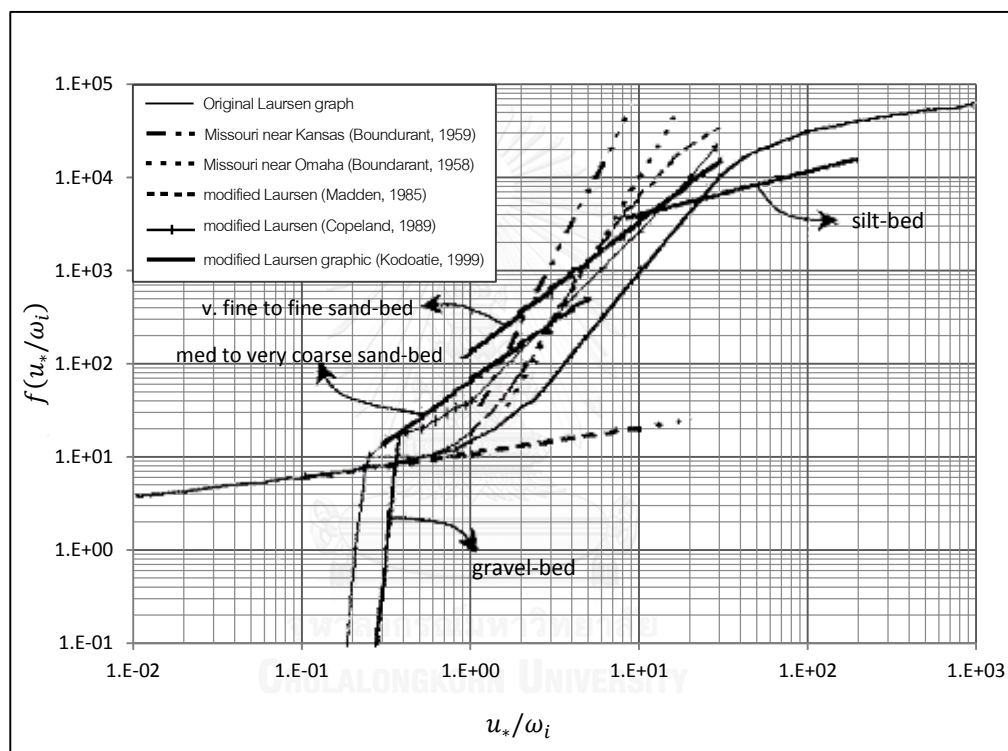
Kodoatie (1999) ได้พัฒนาวิธีการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในคลองชลประทาน ด้วยการปรับปรุงสมการของ Laursen (1958) โดยใช้ข้อมูลจากการสำรวจแม่น้ำ 33 สาย รวม 4,532 ชุด และข้อมูลจากการทดลอง 919 ชุด ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีช่วงกว้างมาก คือมีความลึกการไหลตั้งแต่ 0.67 ถึง 5.13 เมตร และความกว้างลำน้ำ 3.19 ถึง 140.2 เมตร ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จะถูกสุ่มแยกเป็น 2 กลุ่ม แต่ละกลุ่มแบ่งเป็น 4 ขนาดของอนุภาคตะกอนท้องน้ำ คือ ท้องน้ำที่เป็นกรวด (gravel-bed rivers) ท้องน้ำที่เป็นดินทรายถึงดินทรายหยาบมาก (Medium to very coarse sand-bed rivers) ท้องน้ำที่เป็นดินทรายละเอียดมากถึงดินทรายละเอียด (Very fine to fine sand-bed rivers) และท้องน้ำที่เป็นดินทรายแป้ง (silt-bed rivers)

Kodoatie (1999) ได้พิจารณากลุ่มพารามิเตอร์ 3 อย่าง ในการปรับปรุงสมการของ Laursen (1958) คือ Stream power (τu), Unit stream power (uS) และ Dimensionless unit stream power (uS/ω) ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson (Pearson Correlation Coefficients) พบว่า กลุ่มของ Dimensionless unit stream power (uS/ω) มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของตะกอนที่คำนวณได้ดีที่สุด ซึ่งได้ผลการปรับปรุงสมการของ Laursen ดังรูปที่ 1-7 และได้สมการ คือ

$$C_t = 0.01\gamma \left(\frac{d_{50}}{d}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_{c50}} - 1\right) 10^{f\left(\frac{u_*}{\omega_{50}}\right)} \left(\frac{uS}{\omega}\right)^a \quad (1.8)$$

ค่าของ a ที่ใช้ในสมการขึ้นกับลักษณะวัสดุท้องน้ำ ดังนี้

วัสดุท้องน้ำ	a
Gravel	0
Medium to very coarse sand	-0.2
Very fine to fine sand	0.078
Silt	0.06



รูปที่ 1-7 การปรับปรุงกราฟความสัมพันธ์ของ Laursen (1958) โดย Kodoatie (1999)

(Kodoatie et al., 2000)

Kodoatie ได้สรุปผลการเปรียบเทียบวิธีการปรับปรุงสมการ Laursen แสดงในตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1-2 เปรียบเทียบวิธีการปรับปรุงสมการ Laursen (Kodoatie et al., 2000)

Madden	Copeland	Kodoatie
ใช้สมการของ Laursen แต่คูณด้วยพจน์ของ Froude Number ที่เป็นค่าปรับแก้	ใช้ grain hydraulic roughness แทนที่ใช้ grain shear stress	ใช้สมการของ Laursen แต่คูณด้วยพจน์ของ dimensionless stream power ที่เป็นค่าปรับแก้
ใช้กราฟที่ปรับปรุงขึ้น	ใช้กราฟที่ปรับปรุงขึ้น	ใช้กราฟที่ปรับปรุงขึ้น ซึ่งขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุตะกอนท้องน้ำ ตั้งแต่ขนาดทรายแป้ง (silt) ไปจนถึงกรวด (gravel)
ใช้สัดส่วนของแต่ละขนาดที่มี	ใช้สัดส่วนของแต่ละขนาดที่มี	ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเดียว (ไม่ใช้สัดส่วนของแต่ละขนาดที่มี)
ใช้ข้อมูลของแม่น้ำอาร์คันซอ (Arkansas)	ใช้ข้อมูลของแม่น้ำและการทดลอง	ใช้ข้อมูลของแม่น้ำ 33 สาย และอีก 18 แหล่งข้อมูลที่ทำกรทดลอง (รวมมีกว่า 5,300 ชุดข้อมูล)
กราฟที่ได้ยู่สูงกว่ากราฟเดิมของ Laursen สำหรับท้องน้ำที่เป็นทราย ไม่ได้พิจารณาขนาดของกรวดและทรายแป้ง (silt)	กราฟที่ได้ยู่สูงกว่ากราฟเดิมของ Laursen สำหรับท้องน้ำที่เป็นทราย ไม่ได้พิจารณาขนาดของทรายแป้ง (silt) ส่วนกราฟของขนาดกรวดให้ค่าน้อยกว่ากราฟเดิม	กราฟที่ได้ยู่สูงกว่ากราฟเดิมของ Laursen สำหรับท้องน้ำที่เป็นทราย (ท้องน้ำที่เป็นทรายแป้งเป็น ดินทรายละเอียดมาก (very fine sand) ถึง ดินทรายละเอียด (fine sand) และ ดินทราย (medium sand) ถึง ดินทรายหยาบมาก (very coarse sand)) ส่วนกราฟของขนาดทรายแป้ง (silt) จะให้ค่าลดลงกว่ากราฟเดิม และมีการพิจารณากราฟของขนาดกรวดด้วย

บทที่ 2

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาประกอบด้วย 4 กลุ่มน้ำหลัก ได้แก่ กลุ่มน้ำปิง กลุ่มน้ำวัง กลุ่มน้ำยม และกลุ่มน้ำน่าน ตั้งอยู่ทางภาคเหนือของประเทศไทย เป็นกลุ่มน้ำที่อยู่ในกลุ่มลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน ซึ่งเป็นกลุ่มลุ่มน้ำขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ลักษณะโดยทั่วไปของแม่น้ำในแต่ละลุ่มน้ำมีดังต่อไปนี้

2.1. กลุ่มน้ำปิง

แม่น้ำปิง รหัสลุ่มน้ำหมายเลข 06 อยู่ระหว่างเส้นละติจูด $15^{\circ} 24' 00''$ ถึง $19^{\circ} 49' 00''$ เหนือ และเส้นลองจิจูด $98^{\circ} 05' 30''$ ถึง $100^{\circ} 09' 12''$ ตะวันออก ลุ่มน้ำแม่น้ำปิงและลุ่มน้ำสาขาคอบคลุมพื้นที่รองรับน้ำฝนประมาณ 34,537 ตารางกิโลเมตร อยู่ในเขตพื้นที่ 5 จังหวัด คือ จังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน ตาก กำแพงเพชร และนครสวรรค์ ความยาวลำน้ำประมาณ 740 กิโลเมตร มีอาณาเขตติดต่อคือ ทิศเหนือและทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำสาละวินและลุ่มน้ำกก ทิศใต้ติดกับลุ่มน้ำสะแกกรังและลุ่มน้ำแม่กลอง ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำยมและวัง

แม่น้ำปิงมีต้นกำเนิดจากเทือกเขาผีปันน้ำในเขตอำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ สภาพภูมิประเทศตอนบนของลุ่มน้ำปิงเป็นเทือกเขาสลับซับซ้อนปกคลุมด้วยป่าไม้ ลำน้ำในช่วงที่ไหลผ่านท้องที่อำเภอเชียงดาวอยู่ที่ระดับความสูงระหว่าง 500-1,300 เมตร รทก. มีความลาดชันท้องน้ำประมาณ 1:40 ไหลลงทางทิศใต้ไปตามหุบเขาตอนบนในเขตอำเภอแม่แตง มีระดับความสูงระหว่าง 320-500 เมตร รทก. ความลาดชันท้องน้ำประมาณ 1:50 แม่น้ำปิงไหลผ่านที่ราบในหุบเขาในเขตอำเภอแม่แตง อำเภอแมริม อำเภอเมือง พื้นที่มีระดับความสูงประมาณ 260-300 เมตร รทก. ความลาดชันของท้องน้ำประมาณ 1:1,800 แม่น้ำจะไหลผ่านพื้นที่ราบในหุบเขาก่อนไหลลงอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล มีระดับความสูง 140-260 เมตร รทก. ความลาดชันท้องน้ำประมาณ 1:1,590 พื้นที่ราบตอนล่างของเขื่อนภูมิพลอยู่ในเขตจังหวัดตาก กำแพงเพชร และนครสวรรค์ มีระดับความสูงประมาณ 25-140 เมตร รทก. ความลาดชันท้องน้ำประมาณ 1:2,300 (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555b)

2.2. กลุ่มน้ำวัง

แม่น้ำวัง รหัสลุ่มน้ำหมายเลข 07 อยู่ระหว่างเส้นละติจูด $17^{\circ} 05' 00''$ ถึง $19^{\circ} 30' 00''$ เหนือ และเส้นลองจิจูด $98^{\circ} 54' 00''$ ถึง $99^{\circ} 58' 00''$ ตะวันออก เป็นแควที่มีขนาดเล็ก และสั้นที่สุดของ

แม่น้ำเจ้าพระยา ครอบคลุมพื้นที่รองรับน้ำฝน 10,793 ตารางกิโลเมตร พื้นที่ส่วนใหญ่ครอบคลุม 2 จังหวัด คือ จังหวัดลำปางและตาก และมากกว่าร้อยละ 90 อยู่ในเขตจังหวัดลำปาง ความยาวลำน้ำ ประมาณ 460 กิโลเมตร มีอาณาเขตติดต่อ คือ ทิศเหนือติดกับลุ่มน้ำโขงและลุ่มน้ำแม่กก ทิศใต้และ ทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำปิง ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำยม

แม่น้ำวังเกิดจากเทือกเขาผีปันน้ำ บริเวณดอยหลวง บ้านป่าหุ้ง อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย ในเขตอำเภอ เขตรอยต่อระหว่างจังหวัดลำปาง พะเยา และเชียงราย ไหลผ่านหุบเขาและเข้าสู่ที่ราบ ในเขตตัวเมืองจังหวัดลำปาง และไหลไปบรรจบกับแม่น้ำปิงด้านท้ายน้ำจากเขื่อนภูมิพลไปประมาณ 30 กิโลเมตร ที่บ้านปากวัง ตำบลตากออก อำเภอบ้านตาก จังหวัดตาก สภาพภูมิประเทศตอนบนของ ลุ่มน้ำวังเป็นเทือกเขาและป่าไม้ มีความลาดชันของแม่น้ำวัง ประมาณ 1:60 เมื่อไหลผ่านพื้นที่อำเภอ วังเหนือและอำเภอแจ้ห่ม ความลาดชันจะลดลงเหลือประมาณ 1:360 โดยมีระดับความสูงระหว่าง 365-440 เมตร รทก. และความลาดชันของท้องน้ำจะลดลงเมื่อไหลใกล้อ่างเก็บน้ำเขื่อนกิ่วลม โดยมีความลาดชันเฉลี่ย 1:1,260 พื้นที่ตอนล่างของเขื่อนกิ่วลมเป็นพื้นที่ราบกว้างใหญ่อยู่ในเขตอำเภอ เมืองลำปาง อำเภอเกาะคา และอำเภอสบปราบ มีลำน้ำสาขาหลายสายไหลมาบรรจบ เช่น น้ำแม่จาง และน้ำแม่ดำ ก่อนที่ไหลผ่านที่ราบแคบๆ ตามหุบเขาในเขตอำเภอเถิน อำเภอแม่พริก จังหวัด ลำปาง และไหลเข้าสู่พื้นที่ราบในเขตจังหวัดตากไปบรรจบแม่น้ำปิง โดยมีความลาดชันท้องน้ำ 1:1,990 และระดับความสูงของพื้นที่ประมาณ 130 เมตร รทก. (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555d)

2.3. ลุ่มน้ำยม

แม่น้ำยม รหัสลุ่มน้ำหมายเลข 08 อยู่ระหว่างเส้นละติจูด 14° 50' 00" ถึง 18° 25' 00" เหนือ และเส้นลองจิจูด 99° 16' 00" ถึง 100° 40' 00" ตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่รองรับน้ำฝน 24,047 ตารางกิโลเมตร ในเขตพื้นที่ 11 จังหวัด ได้แก่ พะเยา น่าน ลำปาง แพร่ ตาก กำแพงเพชร สุโขทัย พิษณุโลก อุตรดิตถ์ พิจิตร และนครสวรรค์ โดยจังหวัดที่มีพื้นที่เกือบทั้งหมดอยู่ในลุ่มน้ำยม คือ จังหวัดแพร่และสุโขทัย ความยาวลำน้ำประมาณ 735 กิโลเมตร มีอาณาเขตติดต่อ คือ ทิศเหนือติดกับ ลุ่มน้ำโขง ทิศใต้ติดกับลุ่มน้ำปิง ทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำปิงและวัง ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำน่าน

แม่น้ำยมมีต้นกำเนิดจากดอยขุนยวมในทิวเขาผีปันน้ำ อยู่ในเขตอำเภอปงและอำเภอเชียง ม่วน จังหวัดพะเยา ไหลผ่านหุบเขาที่มีความลาดชันมากโดยมีความลาดชันลำน้ำ ประมาณ 1:700 และมีระดับความสูงที่ 180-360 ม.รทก. มีที่ราบแคบๆ ริมแม่น้ำเป็นบางตอนก่อนไหลเข้าสู่เขตจังหวัด แพร่ จากนั้นจะไหลออกสู่ที่ราบผืนใหญ่ ผ่านอำเภอสอง อำเภอสูงเม่น อำเภอเด่นชัย จากนั้นจะไหล

เข้าหุบเขาทางทิศตะวันตก ผ่านอำเภอลอง อำเภอวังชิ้น แล้วไหลลงทางใต้เข้าสู่ที่ราบที่อำเภอศรีสัช
 นาลัย จังหวัดสุโขทัย ในขณะนี้แม่น้ำยมจะไหลคู่ขนานมากับแม่น้ำน่าน และเริ่มมีความลาดชันลดลง
 โดยมีความลาดชันลำน้ำ ประมาณ 1:2,300 ระดับความสูงของพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำอยู่ที่ระดับ 50-180 ม.
 รทก. จากนั้นจะไหลผ่านอำเภอสวรรคโลก อำเภอศรีสำโรง อำเภอกงไกรลาศ และไหลผ่านอำเภอบาง
 ระกำ จังหวัดพิษณุโลก เข้าสู่อำเภอสามงาม จังหวัดพิจิตร ผ่านอำเภอโพทะเล จนเข้าเขตจังหวัด
 นครสวรรค์ แล้วไหลมาบรรจบกับแม่น้ำน่าน ที่บ้านเกยชัย อำเภอชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์โดยมี
 ความลาดชันลำน้ำต่ำ ประมาณ 1:5,000 ถึง 1:35,000 มีระดับความสูงของพื้นที่อยู่ระหว่าง 20-50
 ม.รทก. (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555c)

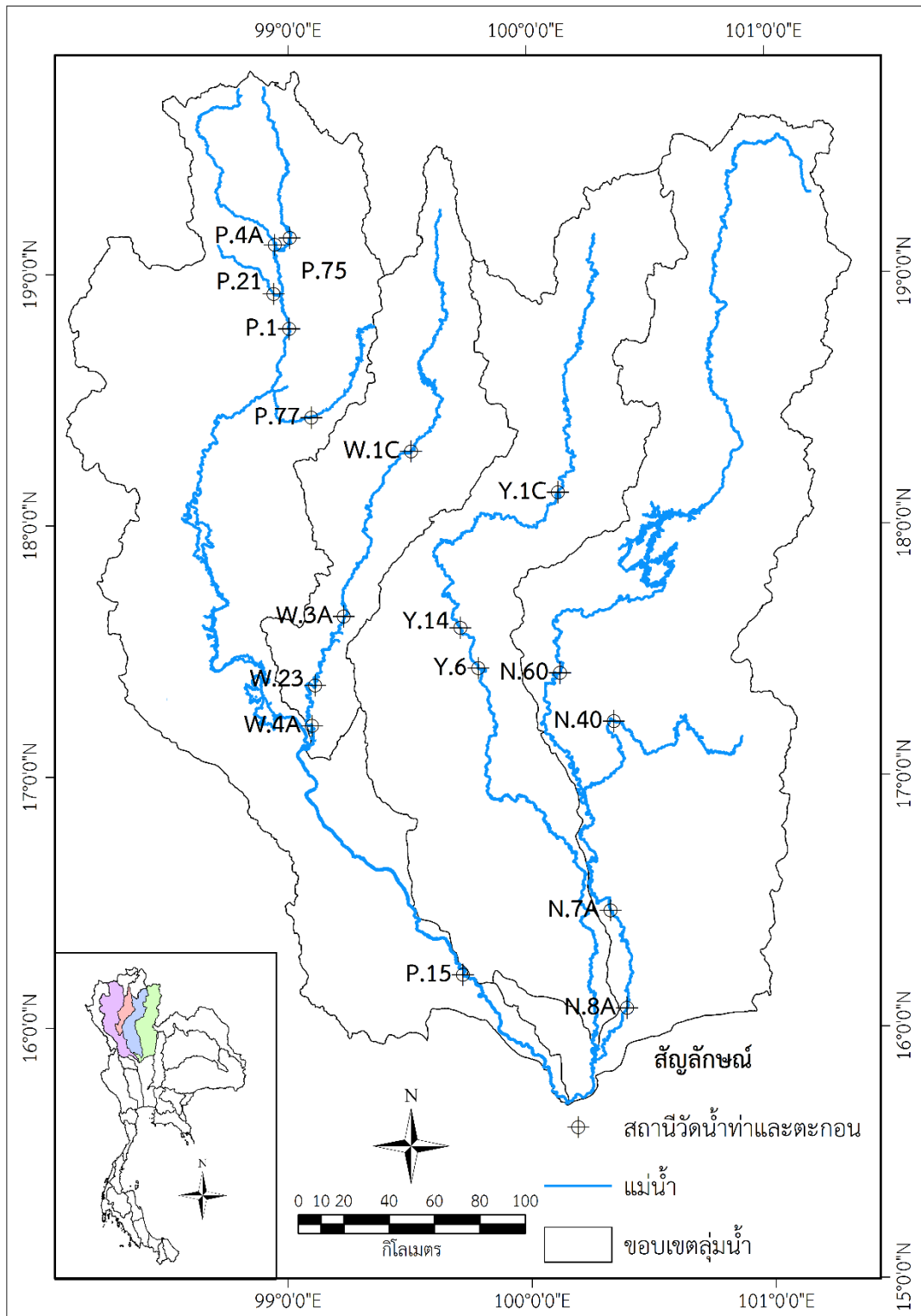
2.4. กลุ่มน้ำน่าน

แม่น้ำน่าน รหัสลุ่มน้ำหมายเลข 09 อยู่ระหว่างเส้นละติจูด $15^{\circ} 42' 12''$ ถึง $19^{\circ} 37' 48''$
 เหนือ และเส้นลองจิจูด $99^{\circ} 51' 30''$ ถึง $101^{\circ} 21' 48''$ ตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่รองรับน้ำฝน
 34,682 ตารางกิโลเมตร ในเขตพื้นที่ 11 จังหวัด ได้แก่ กำแพงเพชร พะเยา แพร่ น่าน เลย สุโขทัย
 อุตรดิตถ์ พิษณุโลก พิจิตร เพชรบูรณ์ และนครสวรรค์ ความยาวลำน้ำประมาณ 770 กิโลเมตร มี
 อาณาเขตติดต่อ คือ ทิศเหนือติดกับลุ่มน้ำโขง ทิศใต้ติดกับลุ่มน้ำเจ้าพระยา ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำ
 โขงและลุ่มน้ำป่าสัก และทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำยม

แม่น้ำน่านมีต้นกำเนิดมาจากเทือกเขาหลวงพระบาง ซึ่งเป็นเส้นแบ่งเขตแดนไทย-ลาว มี
 ความสูงอยู่ที่ระดับ 220 ม.รทก. ความลาดชันประมาณ 1:480 ในเขตอำเภอทุ่งช้าง และอำเภอเชียง
 กลาง จากนั้นไหลผ่านที่ราบระหว่างหุบเขาในเขตอำเภอเมือง และอำเภอเวียงสา จังหวัดน่าน โดยหุบ
 เขาทางด้านตะวันตกและตะวันออกทั้งสองด้านนี้เป็นต้นกำเนิดของลำน้ำสาขาหลายสาย พื้นที่ราบ
 บริเวณนี้จะมีระดับความสูงประมาณ 180-220 ม.รทก. มีความลาดชันประมาณ 1:3,500 จากนั้น
 แม่น้ำน่านจะไหลผ่านหุบเขาลงสู่อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ ความลาดชันจะมากขึ้นในช่วงนี้ เป็น 1:5,300 พื้นที่
 ราบตอนล่างของเขื่อนทดน้ำนเรศวรมีระดับเฉลี่ยประมาณ 27 เมตร รทก. โดยท้องน้ำจะมีความลาด
 ชันน้อย คือประมาณ 1:13,600 พื้นที่ตอนล่างของกลุ่มน้ำน่านจะเป็นที่ราบสองฝั่งแม่น้ำซึ่งจัดได้ว่าเป็น
 ทุ่งราบผืนใหญ่ที่สำคัญที่สุดของประเทศไทย จากจังหวัดพิษณุโลก แม่น้ำน่านจะไหลเคียงคู่กับแม่น้ำ
 ยมลงมาจนบรรจบกันที่อำเภอชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์ จากนั้นจะไหลผ่านบึงบอระเพ็ดทางฝั่งซ้าย
 ก่อนจะบรรจบกับแม่น้ำปิง ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของแม่น้ำเจ้าพระยา
 (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555a)

ในการศึกษานี้ ตำแหน่งของการศึกษาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม พิจารณาจากสถานีวัดน้ำท่าของกรมชลประทาน ที่ได้ทำการเก็บข้อมูลอุทกวิทยาไว้ ทั้งนี้ ได้เลือกสถานีวัดน้ำท่าทั้งสิ้น 17 สถานี แสดงตำแหน่งดังรูปที่ 2-1 เพื่อทำการสำรวจวัสดุท้องน้ำ โดยแบ่งเป็นแม่น้ำปิง 6 สถานี แม่น้ำวัง 4 สถานี แม่น้ำยม 3 สถานี และแม่น้ำน่าน 4 สถานี โดยได้ออกสำรวจภาคสนามในช่วงวันที่ 25 ถึง 29 ธันวาคม 2558 รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2-1





รูปที่ 2-1 ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสำรวจวัสดุท้องน้ำ

ตารางที่ 2-1 รายละเอียดตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสำรวจวัสดุท้องน้ำ

ลำดับ	วันที่เก็บข้อมูล	แม่น้ำ	รหัสสถานี	ละติจูด	ลองจิจูด	ที่ตั้ง	พื้นที่รับน้ำ* (ตร.กม.)
1	27-12-58	ปิง	P.1	18°47'24"N	99°00'13"E	สะพานนารัฐ ต.วัดเกตุ อ.เมือง จ.เชียงใหม่	6,350
2	27-12-58	แม่แตง	P.4A	19°07'20"N	98°56'40"E	บ้านแม่แตง ต.สันมหาพน อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่	1,930
3	25-12-58	ปิง	P.15	16°13'02"N	99°43'21"E	หน้าวัดศรีภิรมย์ บ้านคลองขลุง ต.คลองขลุง อ.คลองขลุง จ.กำแพงเพชร	43,805**
4	26-12-58	แม่ริม	P.21	18°55'39"N	98°56'22"E	บ้านริมใต้ ต.ริมเหนือ อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่	452
5	27-12-58	ปิง	P.75	19°08'46"N	99°36'28"E	บ้านช่อแล ต.ช่อแล อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่	30,879
6	26-12-58	แม่ทา	P.77	18°25'60"N	99°05'06"E	บ้านสบแม่สะปืด ต.ทาสบเส้า อ.แม่ทา จ.ลำพูน	550
7	27-12-58	วัง	W.1C	18°17'54"N	99°30'43"E	สะพานเสควารี ต.เวียงเหนือ อ.เมือง จ.ลำปาง	3,478
8	26-12-58	วัง	W.3A	17°38'21"N	99°13'50"E	บ้านดอนชัย ต.ล้อมแรด อ.เถิน จ.ลำปาง	8,924
9	25-12-58	วัง	W.4A	17°12'18"N	99°05'53"E	บ้านวังหมัน ต.วังหมัน อ.สามเงา จ.ตาก	10,439
10	25-12-58	วัง	W.23	17°22'00"N	99°06'48"E	บ้านเชียงราย ต.ยกกระบัตร อ.สามเงา จ.ตาก	9,930
11	27-12-58	ยม	Y.1C	18°08'03"N	100°07'27"E	บ้านน้ำคัง ต.ป่าเมต อ.เมือง จ.แพร่	7,749
12	28-12-58	ยม	Y.6	17°25'53"N	99°48'05"E	บ้านแก่งหลวง ต.ท่าชัย อ.ศรีสัชชาลัย จ.สุโขทัย	12,769
13	28-12-58	ยม	Y.14	17°35'43"N	99°42'59"E	บ้านดอนระเบียง ต.แม่สำ อ.ศรีสัชชา ลัย จ.สุโขทัย	12,100
14	29-12-58	น่าน	N.7A	16°28'00"N	100°19'53"E	บ้านราชช้างขวัญ ต.ปากทาง อ.เมือง จ.พิจิตร	27,897
15	29-12-58	น่าน	N.8A	16°02'54"N	100°22'33"E	บ้านหอไกร ต.หอไกร อ.บางมูลนาก จ.พิจิตร	21,471
16	28-12-58	แควน้อย	N.40	17°13'27"N	100°20'56"E	บ้านหนองบอน ต.คันไช้ อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก	4,264
17	28-12-58	น่าน	N.60	17°25'05"N	100°07'54"E	บ้านเด่นสำโรง ต.หาดสองแคว อ.ตรอน จ.อุตรดิตถ์	18,447

*ข้อมูลจาก กลุ่มงานตะกอนและคุณภาพน้ำ. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับพื้นที่ลุ่มน้ำใน 25 ลุ่มน้ำหลัก, กลุ่มงานตะกอนและคุณภาพน้ำ, ส่วนอุทกวิทยา, สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ, กรมชลประทาน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2555.

**ข้อมูลจาก สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน). การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง ลุ่มน้ำปิง. รายงานการศึกษา. บริษัท แอสตีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด, กุมภาพันธ์ 2555.

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีการเคลื่อนที่ของตะกอน

“load” หมายถึง วัสดุที่ถูกทำให้เคลื่อนที่ได้ ซึ่งบางครั้งจะใช้คำว่า “discharge” แทน ซึ่งหมายถึง อัตราการเคลื่อนที่ของวัสดุ ดังนั้น “sediment discharge” จึงหมายถึง อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนส่วนที่มีการเคลื่อนที่ หรือ “sediment load” นั่นเอง (Woo et al., 1986)

3.1. ประเภทของการนำพาตะกอน

ตะกอน คือ เศษวัสดุที่มีแหล่งกำเนิดจากขบวนการแตกสลายของดินและหินที่ประกอบขึ้นเป็นเปลือกโลก โดยทางกลศาสตร์ ทางกายภาพ และทางเคมี จะเคลื่อนที่ไปตามแรงโน้มถ่วงโดยมีตัวกลางประกอบด้วย แรงลม แรงแม่เหล็ก ธารน้ำแข็ง หรือโดยตัวกลางหลายอย่างรวมกัน ขนาดของเม็ดตะกอนจะมีขนาดแตกต่างกัน ตั้งแต่ขนาดใหญ่ไปจนถึงเศษวัสดุแขวนลอย แตกต่างกันในรูปทรง ตั้งแต่กลมไปจนถึงเหลี่ยมมุม นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างกันในความถ่วงจำเพาะและส่วนประกอบแร่ธาตุ (กลุ่มงานตะกอนและคุณภาพน้ำ, 2555)

การนำพาตะกอนแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ขึ้นกับวิธีการแบ่ง 2 วิธี คือ

3.1.1. แบ่งตามชนิดของตะกอน

เป็นการแบ่งโดยใช้ที่มาของตะกอนเป็นสำคัญ สัมพันธ์กับขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำที่พบ คือ

- 1) ตะกอนวัสดุท้องน้ำ (bed-material load) หมายถึงปริมาณตะกอนทั้งหมดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัสดุที่พบบนท้องน้ำ ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคตะกอน จะพิจารณาเฉพาะตะกอนวัสดุท้องน้ำ เนื่องจากตะกอนละเอียดจะไม่มีผลต่อการกัดเซาะหรือทับถม ดังนั้น ปริมาณตะกอนรวมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัสดุที่พบบนท้องน้ำ จึงมีปริมาณการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการไหลในลำน้ำ
- 2) ตะกอนละเอียด หรือ ตะกอนชะล้าง (wash load) เป็นการเคลื่อนที่ของตะกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า $60 \mu\text{m}$ เล็กกว่าวัสดุท้องน้ำ มักจะเป็นดินโคลนและดินเหนียว เป็นส่วนของวัสดุที่ไม่พบบนท้องน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดจากการชะล้างผิวลำน้ำและผิวดินสองฝั่งเข้าสู่ลำน้ำ ดังนั้น ปริมาณของตะกอนชะล้างนี้จึงไม่ขึ้นกับคุณสมบัติการไหลในลำน้ำ แต่จะขึ้นกับปริมาณการไหลเข้า (rate of supply)

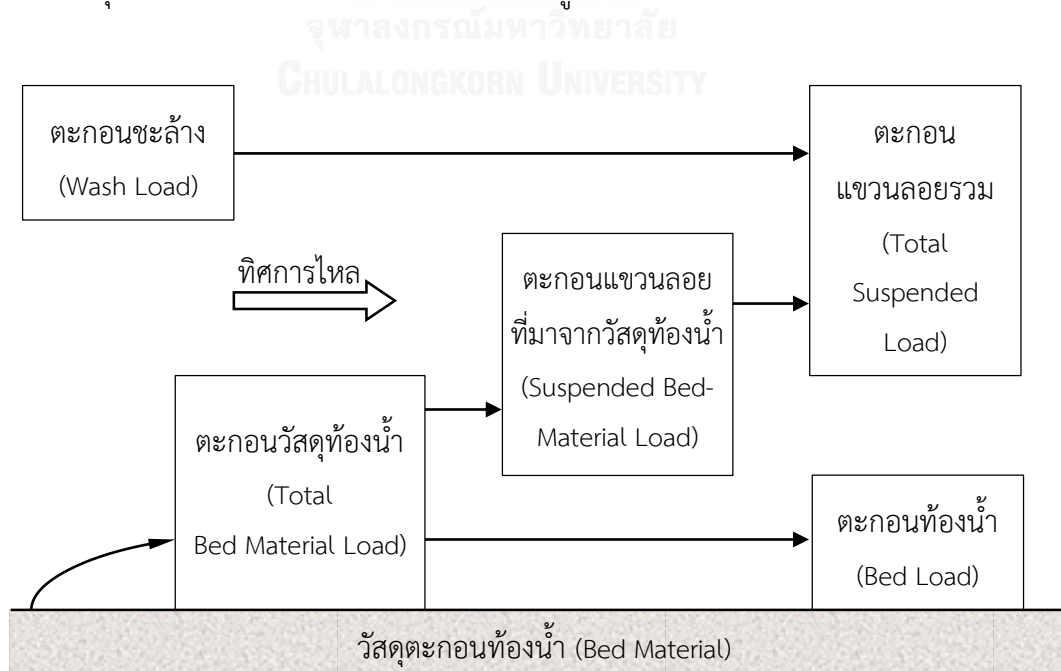
3.1.2. แบ่งตามกลไกการเคลื่อนที่

ตะกอนสามารถแบ่งออกตามลักษณะการเคลื่อนตัวของตะกอนไปกับกระแสน้ำ โดยสัมพันธ์กับขนาดของตะกอน ได้ 2 ชนิด ได้แก่

- 1) ตะกอนแขวนลอยรวม (total suspended load) เป็นตะกอนขนาดเล็กที่แขวนลอยไปกับน้ำ ด้วยแรงยกของการไหลแบบปั่นป่วน กล่าวคือ แรงโน้มถ่วงที่มีต่อน้ำหนักตะกอนถูกสมดุลโดยแรงดันขึ้นจากความปั่นป่วนของการไหลรวมทั้งแรงลอยตัว โดยจะคงสภาพแขวนลอยไปกับน้ำเป็นระยะเวลานาน และสามารถลอยไปได้ไกล โดยทั่วไปตะกอนแขวนลอยจะมีสัดส่วนมากที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณตะกอนรวม
- 2) ตะกอนท้องน้ำ (bed load) เป็นตะกอนขนาดหยาบหรือขนาดใหญ่ ทั่วไปเป็นกรวดและทราย มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคตะกอนโดยการไถล (sliding) กลิ้ง (rolling) หรือการกระโดด (saltation) ไปบนผิวท้องน้ำ ตะกอนชนิดนี้มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของท้องน้ำและตลิ่ง โดยทั่วไปสำหรับแม่น้ำตะกอนทราย ชั้นของตะกอนท้องน้ำจะอยู่ในชั้นที่มีความสูงไม่เกิน 3 นิ้ว จากผิวท้องน้ำ (ไพทอร์ย, 2537)

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการแบ่งตะกอนทั้ง 2 แบบ จะมีตะกอนส่วนที่ทับซ้อนกันอยู่ซึ่งเรียกว่า ตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ (suspended bed-material load) เป็นตะกอนที่เคลื่อนที่แขวนลอยไปกับน้ำ และมีขนาดซึ่งพบได้ในวัสดุท้องน้ำ (Ponce, 1989)

สรุปประเภทของการนำพาตะกอน แสดงดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 ประเภทของการนำพาตะกอน

3.2. สมการอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม

อนุภาคตะกอนที่นับเป็นตะกอนท้องน้ำในเวลาหนึ่ง อาจกลายเป็นตะกอนแขวนลอยได้ในอีกเวลาหนึ่งหรือในอีกตำแหน่งหนึ่ง กลับไปกลับมา ยกเว้นอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งมักจะเป็นได้เฉพาะตะกอนท้องน้ำเท่านั้น ดังนั้น การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมจึงสามารถหาได้จาก 3 ความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 3-2

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการแบ่งประเภทของตะกอนทั้ง 2 แบบ		ประเภทของตะกอน	
		แบ่งตามกลไกการเคลื่อนที่	แบ่งตามที่มาของตะกอน
ตะกอนรวม (total sediment load)	ตะกอนชะล้าง (wash load)	ตะกอนแขวนลอยรวม (total suspended load)	ตะกอนชะล้าง (wash load)
	ตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ (suspended bed-material load)		ตะกอนวัสดุท้องน้ำ (total bed material load)
	ตะกอนท้องน้ำ (bed load)	ตะกอนท้องน้ำ (bed load)	

รูปที่ 3-2 ส่วนประกอบของตะกอนรวมแบ่งตามประเภทของตะกอน (Ponce, 1989)

แบ่งตามที่มาของตะกอน

อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม = อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนวัสดุท้องน้ำ + อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนชะล้าง

แบ่งตามกลไกการเคลื่อนที่

อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม = อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ + อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม

ความสัมพันธ์ของการแบ่งตะกอนทั้ง 2 แบบ

อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม = อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ + อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ + อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนชะล้าง

สำหรับวิธีการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมโดยทั่วไป มี 2 แบบ คือ

- 1) คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแต่ละประเภท แล้วนำมารวมกัน
- 2) คำนวณจากสมการการหาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมโดยตรง โดยไม่ต้องแยกเป็นตะกอนท้องน้ำ และตะกอนแขวนลอย

3.2.1. ประเภทของสมการ

ในการวิเคราะห์การพัดพาของตะกอนเพื่อสร้างความสัมพันธ์เป็นสมการคำนวณหาปริมาณของตะกอนรวมนั้น ได้มีผู้เก็บรวบรวมข้อมูลและทำการทดลองแล้วสรุปเป็นสมการในการวิเคราะห์ตะกอนแยกเป็นกลุ่ม ๆ แต่ละสมการนั้นจะใช้ได้ดีเมื่อข้อมูลที่สำรวจได้จริงมีความสอดคล้องกับสมมติฐานในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของสมการนั้น ๆ หรือบริเวณที่จะวิเคราะห์ปริมาณตะกอนรวมมีลักษณะคล้ายคลึงกับลักษณะทางกายภาพที่ศึกษาของสมการนั้น ๆ และรวมทั้งผลเนื่องมาจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการอีกด้วย ดังนั้นจึงยังไม่มีผู้ใดสามารถให้ข้อสรุปได้ว่า สมการในกลุ่มใดและสมการของใคร คือสมการที่มีความเหมาะสมหรือเป็นสมการที่แม่นยำและถูกต้องที่สุดในการประเมินหาปริมาณตะกอนรวมที่มีในลำน้ำ

ดังนั้น ในการวิเคราะห์อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำจากสมการต่าง ๆ นั้น จึงควรพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลตะกอนที่สำรวจได้กับค่าพารามิเตอร์ที่แต่ละสมการต้องการ รวมทั้งสมมติฐานของสมการเหล่านั้นด้วย

การพัฒนาสมการที่ใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำและตะกอนวัสดุท้องน้ำสามารถแบ่งหลักการที่นิยมใช้ได้ 4 หลักการ (Gray and Simões, 2008) ได้แก่

- 1) Shear Stress หรือ Tractive Force

วิธีนี้สมมติให้แม่น้ำมีความสามารถในการนำพาตะกอนให้เคลื่อนที่ มีค่าผันแปรตามความเค้นเฉือน (shear stress) ของท้องน้ำโดยตรง หรือขึ้นกับความแตกต่างของความเค้นเฉือน (shear stress) ที่ทำกับอนุภาคตะกอนที่ท้องน้ำ และความเค้นเฉือนวิกฤต (critical shear stress) ที่ทำให้อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ได้ ความยากของวิธีนี้คือจำเป็นต้องหาความเค้นเฉือนประสิทธิผลท้องน้ำ (effective bed shear stress) ซึ่งต้องเท่ากับแรงต้านท้องน้ำ (bed-form drag) รวมทั้งการหาค่าที่ต่างกันของ grain roughness และความเค้นเฉือนทั้งหมด (total bed shear stress) ในการหาจุดเริ่มต้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่วิเคราะห์ได้ยาก โดยทั่วไปมักใช้วิธีของ Shields (τ_c) สำหรับแรงยก (lifting force) ที่ทำกับอนุภาคตะกอนมักไม่นำมาพิจารณา ซึ่งนับเป็นอีกหนึ่งสาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่อาจมีได้

2) หลักการพลังงาน

วิธีหลักการพลังงานจะพิจารณาพลังงานที่มีจากการไหลและพลังงานที่ใช้ในการนำพาตะกอน รวมถึงการพิจารณาค่างานที่ทำได้จากการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอน หรือสมมูลของแรงที่ทำกับอนุภาคตะกอน สมการจะใช้หลักการของหน่วยพลังงานกระแส (unit stream power) (พลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของน้ำ) ซึ่งอยู่ในรูปผลคูณของความเร็วเฉลี่ยและความลาดชันทางน้ำ ส่วนสมการที่ใช้หลักพลังงานกระแส (stream power) จะอยู่ในรูปผลคูณของความเค้นเฉือนท้องน้ำ (bed shear stress) กับ ความเร็วการไหลเฉลี่ย ที่แสดงในรูปของพลังงานกระแสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ท้องน้ำ

3) อัตราการไหล หรือ ความเร็วการไหล

วิธีนี้ใช้อัตราการไหลวิกฤต (critical unit water discharge) เป็นเกณฑ์สำหรับการเริ่มเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับความเร็วการไหล ทำให้สมการที่ใช้หลักการนี้เป็นที่วิพากษ์วิจารณ์ เพราะอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนควรขึ้นกับความเร็วการไหลที่อยู่ใกล้พื้นท้องน้ำ มากกว่าค่าความเร็วการไหลเฉลี่ย

4) ความน่าจะเป็น

วิธีของความน่าจะเป็นเกี่ยวข้องกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำที่สัมพันธ์กับความปั่นป่วนของการไหลที่กระทำต่ออนุภาคตะกอน ซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามเวลาและพื้นที่ การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคจะขึ้นกับค่าความน่าจะเป็นของเวลา และพื้นที่นั้น ๆ โดยเฉพาะ ซึ่งการพิจารณาแรงที่ขับเคลื่อนอนุภาคตะกอนย่อมดีกว่าการพิจารณาแรงต้านที่ทำกับอนุภาคตะกอน

นอกเหนือจากหลักการที่กล่าวมา ยังมีการแบ่งสมการตามวิธีการสร้างสมการอีก 4 ประเภท ได้แก่

- I. Empirical equations: สร้างสมการให้เข้ากับข้อมูลจำนวนมากที่มีอยู่
- II. Semitheoretical equations: ใช้หลักการทางกายภาพหรือตามหลักฟิสิกส์ และการใช้เหตุผล
- III. Probability-based equations: ใช้หลักการของความน่าจะเป็น
- IV. Dimensional analysis equations: ใช้การวิเคราะห์แบบไร้หน่วย และเหตุผลทางกายภาพหรือเหตุผลเชิงฟิสิกส์ รวมทั้งมีการใช้ข้อมูลจำนวนมากมาปรับเทียบค่าพารามิเตอร์

สมการทั่วไปที่ใช้คำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำ (Bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ (Bed material load) เรียงตามลำดับปีที่สมการถูกพัฒนาขึ้น สรุปไว้ในตารางที่ 3-1 (Gray and Simões, 2008)

ตารางที่ 3-1 สรุปสมการคำนวณปริมาณตะกอนที่ท้องน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุที่ท้องน้ำ (bed material load)

สมการ	หลักการที่ใช้	ประเภท ^a	ช่วงค่าที่ใช้ ^b	หมายเหตุ
Du Buoy's (1879)	ทฤษฎี: excess of shear stress	B	—	เป็นการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแบบแรกที่เป็นที่รู้จัก โดยมีการว่าตะกอนที่ท้องน้ำเคลื่อนที่ในชั้นตะกอนที่มีการไหล (sliding layer) ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ได้มาจากกราฟทดลอง และมีช่วงค่าที่จำกัด ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเทียบหาค่าสมการไปใช้
Schoklitsch (1934) ^c	ทฤษฎี: excess of shear stress	B	$0.305 \leq d \leq 7.02$	สามารถใช้ได้กับตะกอนขนาดกลาง โดยแบ่งเป็นสัดส่วนตะกอน สมการคำนวณปริมาณตะกอนที่ท้องน้ำเป็นฟังก์ชันของอัตราไหลของน้ำ
Shields (1936)	กึ่งเอมพิริคัล: excess of shear stress	B	$1.56 < d < 2.47$ $1.06 < s < 4.25$	พิสูจน์ให้เห็นว่ามีปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของตะกอน และได้สร้างสมการที่เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง
Einstein (1942, 1950) ^c	ทฤษฎี, ความน่าจะเป็น	B, BM	$0.785 \leq d \leq 28.65$	แต่เดิมใช้กับตะกอนขนาดเดียว ภายหลังมีการใช้ hiding factor ให้สามารถใช้กับตะกอนขนาดกลางได้ โดย hiding factor จะเป็นตัวแทนของอนุภาคขนาดเล็กที่ถูกบังโดยอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีอยู่ สมการหาปริมาณตะกอนวัสดุที่ท้องน้ำ (bed material load) เป็นผลรวมของสมการตะกอนที่ท้องน้ำ และสมการตะกอนแขวนลอย สมการของ Einstein นี้มิได้ถูกปรับแก้และพัฒนาโดยหลายบุคคล เช่น Brown (1950), Colby (1964), Pemberton (1972) และ Yalin (1972)

ตารางที่ 3-1 สรุปสมการคำนวณปริมาณตะกอนที่ต้งน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุที่ต้งน้ำ (bed material load) (ต่อ)

สมการ	หลักการที่ใช้	ประเภท ^a	ช่วงค่าที่ใช้ ^b	หมายเหตุ
Kalinske (1947) ^c	ทฤษฎี: ความน่าจะเป็น	B	—	สมการใช้หลักการความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับตะกอนขนาดละเอียด
Meyer-Peter and Müller (1948) ^c	ทฤษฎี: excess of shear stress	B	$0.15 \leq W \leq 2$ $0.01 \leq D \leq 1.2$ $0.04 \leq S_f \leq 2$ $1.25 \leq p \leq 4$ $0.40 \leq d \leq 30$	พัฒนามาจากการศึกษาของ Meyer-Peter et al. (1934) มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในแม่น้ำที่ไหลผ่านที่ราบสูง ที่มีท้องน้ำเป็นกรวด และไม่ควรใช้กับขนาดตะกอน d ที่เล็กกว่า ~ 1 มิลลิเมตร
Frijlink (1952)	เอมพีริคัล: shear stress	B	—	เป็นวิธีอย่างง่ายที่ใช้ประมาณค่าสมการของ Meyer-Peter and Müller (1948) และ Einstein (1950)
Velikanov (1954)	ทฤษฎี: หลักการพลังงาน	BM	—	สมการได้มาจากทฤษฎีของพลังงานโน้มถ่วง ซึ่งนำไปสู่การสร้างสมการการเคลื่อนที่ของตะกอนอื่น ๆ โดยวิศวกรชาวจีน เช่น Zhang (1959) และ Dou (1974)
Bagnold (1956, 1966)	ทฤษฎี: หลักการพลังงาน	B, BM	$d > 0.015$	สมการปริมาณตะกอนวัสดุที่ต้งน้ำของ Bagnold เป็นผลรวมของสมการตะกอนที่ต้งน้ำ และสมการตะกอนแขวนลอยของเขา

ตารางที่ 3-1 สรุปสมการคำนวณปริมาณตะกอนที่ท้องน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุที่ท้องน้ำ (bed material load) (ต่อ)

สมการ	หลักการที่ใช้	ประเภท ^a	ช่วงค่าที่ใช้ ^b	หมายเหตุ
Laursen (1958) ^c	เอ็มพีริคัล	BM	—	สามารถประยุกต์ใช้ได้กับตะกอนขนาดคละ โดยแบ่งเป็นสัดส่วนตะกอนมีหลักการคำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้มาจากการทดลองของรางทดลองที่มีพื้นราบเป็นทราย โดยไม่ได้แสดงถึงค่าทางกายภาพโดยตรง เนื่องจากวิธีนี้ใช้ข้อมูลที่มาจากการทดลองเป็นหลัก จึงถูกปรับปรุง (modify) และพัฒนาให้เพื่อความเที่ยงตรง (validity) ในการนำไปใช้งานเพิ่มขึ้น เช่น โดย Madden (1993)
Rottner (1959) ^c	เอ็มพีริคัล: พิจารณาค่าไร้หน่วย	B	—	การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ท้องน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง สัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ไร้หน่วย ทั้งความลึกการไหล ความเร็วการไหล และความชัน ใช้การวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) พิจารณาผลของพารามิเตอร์ค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (relative roughness) d_5/d ทั้งนี้ สมการไม่สามารถใช้หาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ท้องน้ำที่มีค่าต่ำ ๆ ได้
WIHEE (1961) ^d	เอ็มพีริคัล	BM	—	เดิมเป็นสมการหาปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ใช้กับแม่น้ำที่ไหลผ่านที่ราบลุ่ม ซึ่งทั่วไปจะมีปริมาณตะกอนที่ท้องน้ำเพียงเล็กน้อย และมีปริมาณตะกอนแขวนลอยเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสมการนี้นิยมใช้ในประเทศจีนอย่างกว้างขวาง

ตารางที่ 3-1 สรุปสมการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ (bed material load) (ต่อ)

สมการ	หลักการที่ใช้	ประเภท ^a	ช่วงค่าที่ใช้ ^b	หมายเหตุ
Yalin (1963, 1972)	ทฤษฎี: หลักการความน่าจะเป็น	B	$0.315 \leq d \leq 28.65$	สมการนี้รวมหลักการของความน่าจะเป็นและหลักการพลังงานเข้าด้วยกัน ตัวอย่างเช่น ใช้หลักการของ Bagnold's rate-of-work ซึ่งพิจารณาการกระโดด (saltation) ของอนุภาคเป็นแบบหนึ่งของการเคลื่อนที่ของตะกอน
Colby (1964) ^c	เอ็มพีริคัล	BM	—	อ่านค่าจากกราฟความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นเพื่อนำมาใช้คำนวณในสมการ รวมถึงมีการปรับแก้สำหรับอัตราการไหลที่มีความเข้มข้นของตะกอนสูง เนื่องจากมีการปรับแก้สำหรับตะกอนละเอียด (fine silt) และ ดินเหนียว (clay) อยู่ สมการของ Colby จึงสามารถใช้ได้กับแม่น้ำที่มีทั้งน้ำที่ตื้นและก้นทรายขนาดกลาง (medium sand) ไปจนถึงขนาดทรายละเอียด (fine sand)
Engelund and Hansen (1967) ^c	กึ่งเอ็มพีริคัล: หลักการพลังงาน	BM	—	ใช้กับท้องน้ำที่มีเนินทราย (sand-dune beds) มีการใช้สมการนี้อย่างแพร่หลายกับแม่น้ำตะกอนทราย แต่วิธีนี้ให้ความแม่นยำได้ไม่เท่ากับวิธีคำนวณการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของตะกอน Yang (2005) ได้แสดงที่มาของความคลาดเคลื่อนของฟังก์ชันการเคลื่อนที่นี้ว่าเป็นขั้นเป็นตอน
Graf and Acaroglu (1968)	กึ่งเอ็มพีริคัล: shear stress	BM	—	สมการถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการไหลในทางน้ำเปิดและการไหลในท่อปิด สำหรับการไหลในทางน้ำเปิดมีลักษณะคล้ายกับสมการของ Einstein (1950)

ตารางที่ 3-1 สรุปสมการคำนวณปริมาณตะกอนที่องน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุที่องน้ำ (bed material load) (ต่อ)

สมการ	หลักการที่ใช้	ประเภท ^a	ช่วงค่าที่ใช้ ^b	หมายเหตุ
Toffaletti (1968, 1969) ^c	ทฤษฎี, ความน่าจะเป็น	BM	—	มีส่วนที่แตกต่างจากวิธีการของ Einstein คือ รวบรวมปรับแก้ต่าง ๆ ให้เหลือเพียงตัวเดียว โดยอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของลำน้ำจึงมีพารามิเตอร์ที่ใช้มากกว่า และใช้การกระจายความเร็วในแนวตั้งในการคำนวณด้วย
Paintal (1971)	เอมพิริคัล: shear stress	B	$\theta < 0.06$ $1 < d \leq 25$	ใช้คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนที่องน้ำที่มีค่า shear stress ต่ำ ๆ
Shen and Hung (1972)	เอมพิริคัล	BM	—	วิเคราะห์สมการถดถอย (regression equation) จากข้อมูลการทดลองของที่องน้ำตะกอนทราย
Ackers and White (1973) ^c	กึ่งเอมพิริคัล: หลักการพลังงาน	BM	$0.04 \leq d \leq 4.94$	ปรับให้เป็นปัจจุบันโดย Acker (1993) เพื่อปรับแก้อัตราการเคลื่อนที่ของวัสดุขนาดละเอียดและขนาดหยาบ สมการปี 1993 นี้ถูกพัฒนาโดย White and Day (1982) เพื่อให้สามารถคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ในแต่ละสัดส่วนของขนาดอนุภาคที่มีได้ Yang (2005) ได้แสดงที่มาของความคลาดเคลื่อนของฟังก์ชันการเคลื่อนที่นี้ว่าเป็นขั้นเป็นตอน

ตารางที่ 3-1 สรุปสมการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ (bed material load) (ต่อ)

สมการ	หลักการที่ใช้	ประเภท ^a	ช่วงค่าที่ใช้ ^b	หมายเหตุ
Yang (1973, 1979)	ทฤษฎี: หลักการพลังงาน	BM	$0.063 \leq d \leq 2.0$	สมการมีหลักการจากหน่วยพลังงานกระแสน้ำ (unit stream power) ค่าสัมประสิทธิ์ได้มาจากการปรับเทียบโดยคอมพิวเตอร์ ใช้ได้กับตะกอนที่มีช่วงขนาดเป็นทรายแป้ง (silt) สมการปี 1979 ควรใช้เมื่อมีความเข้มข้นสูงกว่า 100 mg/L
Engelund and Fredsoe (1976)	ทฤษฎี, ความน่าจะเป็น	B	—	—
Bagnold (1980)	ทฤษฎี: หลักการพลังงาน	BM	—	ใช้หลักการของพลังงานกระแสน้ำ (stream power) และมีการวิเคราะห์แบบสองช่วง (bimodal) ของแม่น้ำที่มีพื้นที่น้ำเป็นกรวด
Brownlie (1981)	กึ่งเอมพีริคัล: หลักการพลังงาน	BM	—	ใช้การวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) ของข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลสนามซึ่งส่วนใหญ่เป็นท้องน้ำตะกอนทราย
Parker et al. (1982)	กึ่งเอมพีริคัล, ความน่าจะเป็น	B	$0.60 \leq d \leq 102.0$	ใช้หลักการของสมดุลการเคลื่อนที่ ซึ่งภายหลังสมการได้ถูกปรับแก้และพัฒนาโดย Diplas (1987) และ Bakke et al. (1999) สมการสามารถใช้ได้กับพื้นที่น้ำที่เป็นกรวดซึ่งอยู่ในชั้นปกคลุมพื้นผิว (pavement layer) และชั้นที่อยู่รองลงมา (subpavement layer) สามารถประยุกต์ใช้ได้กับตะกอนขนาดคละ

ตารางที่ 3-1 สรุปสมการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ (bed material load) (ต่อ)

สมการ	หลักการที่ใช้	ประเภท ^a	ช่วงค่าที่ใช้ ^b	หมายเหตุ
Smart (1984)	เอ็มพีริคัล: shear stress	B	Plane bed $d \geq 0.4$ $0.4 \leq S \leq 20$	สมการสำหรับคำนวณเมื่อมีความลาดชันมาก (steep slopes) โดยใช้ข้อมูลเดิมของ Meyer-Peter and Müller (1948) และข้อมูลใหม่ที่ได้ออกจากจำลองรางน้ำที่มีความลาดชันสูงมาทำการวิเคราะห์ ทั้งนี้ไม่สามารถใช้ได้หากมีความชันเป็นลบ
van Rijn (1984a, 1984b)	กึ่งเอ็มพีริคัล: หลักการพลังงาน	B, BM	$0.2 \leq d \leq 2.0$	ใช้วิธีกึ่งเอ็มพีริคัลต่าง ๆ มาพิจารณาหาสมการอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลอื่น ๆ ถูกนำมาใช้ปรับแต่งสมการให้ยิ่งขึ้น สำหรับสมการหาปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำที่ได้จะเป็นผลรวมของปริมาณตะกอนท้องน้ำ และปริมาณตะกอนแขวนลอย
Yang (1984) ^c	ทฤษฎี: หลักการพลังงาน	BM	$2.0 \leq d \leq 10$	ใช้หลักการหน่วยพลังงานกระแสแม่น้ำ (unit stream power) มาวิเคราะห์ปริมาณตะกอนที่เป็นกรวด
van Rijn (1987)	เอ็มพีริคัล, ความน่าจะเป็น	B	—	—

ตารางที่ 3-1 สรุปสมการคำนวณปริมาณตะกอนที่ท้องน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุที่ท้องน้ำ (bed material load) (ต่อ)

สมการ	หลักการที่ใช้	ประเภท ^a	ช่วงค่าที่ใช้ ^b	หมายเหตุ
Karim and Kennedy (1990)	เอมพิริคัล	BM	—	วิเคราะห์ความถดถอยพหุแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear multiple regression analysis) จากข้อมูลของแม่น้ำ 339 ชุด และข้อมูลจากการทดลองอีก 608 ชุด โดยสมการไม่ได้บ่งบอกถึงความหมายเชิงกายภาพ และต้องใช้เทคนิคการทำการซ้ำในการหาค่าเฉลี่ย
Suszka (1991)	เอมพิริคัล, ความน่าจะเป็น	B	$3.3 \leq d \leq 43.5$ $0.9 \leq D/d \leq 73.3$ $0.17 \leq S \leq 9$ $147 \leq R_e \leq 14000$	ตัดแปลงมาจากสมการของ Graf and Suszka (1987) ซึ่งเป็นการพัฒนาขึ้นสำหรับใช้กับแม่น้ำที่ไหลผ่านที่ราบสูง ที่มีค่าความชันสูง และมีความลึกน้ำตื้น เช่นในกรณีที่มีค่า D/d น้อย ๆ
Yang et al. (1996)	ทฤษฎี: หลักการพลังงาน	BM	—	ใช้หลักการหน่วยพลังงานกระแส (unit stream power) สำหรับการไหลที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนสูง ถูกนำไปใช้กับแม่น้ำเหลือง (Yellow River) ของประเทศจีน
Damgaard et al. (1997)	เอมพิริคัล: shear stress	BM	$2 \leq \theta/\theta_{cr} \leq 6$	ใช้ได้ทั้งกรณีที่มีทางน้ำมีความลาดชันแนวราบ (horizontal slope), ทางน้ำมีความลาดชันน้อย (mild slope) และ ทางน้ำความลาดชันมาก (steep slope) นอกจากนี้ผู้แต่งยังสรุปผลที่ได้จากการคำนวณทางน้ำที่มีความลาดชันมากเมื่อใช้สมการของ Meyer-Peter and Müller (1948)

ตารางที่ 3-1 สรุปสมการคำนวณปริมาณตะกอนที่ต้งน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนวัสดุที่ต้งน้ำ (bed material load) (ต่อ)

สมการ	หลักการที่ใช้	ประเภท ^a	ช่วงค่าที่ใช้ ^b	หมายเหตุ
Karim (1998)	เอมพิริคัล	BM	$0.137 \leq d \leq 28.65$ $20 \leq C \leq 49,300$ $0.03 \leq D \leq 5.29$ $0.32 \leq U \leq 2.88$ $0.015 \leq S \leq 2.4$ $0.09 \leq Fr \leq 2.08$	<p>ทั้งนี้สมการถูกพัฒนาด้วยข้อมูลการทดลองที่จำกัดซึ่งมีตะกอนทรายที่คัดขนาดดี (well-sorted) ขนาดเฉลี่ย $d = 0.208$ มิลลิเมตร</p> <p>ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของตะกอน ได้มาจากการเลือกเส้นกราฟในรูปสมการยกกำลังที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลการทดลอง ทั้งข้อมูลจากแม่น้ำธรรมชาติและข้อมูลจากรางทดลองในห้องปฏิบัติการ ตะกอนมีขนาดคละจึงทำให้มีอนุภาคส่วนที่ถูกลบทิ้งและส่วนที่ไม่ถูกลบทิ้ง ทำให้ผลการคำนวณไม่แม่นยำสำหรับห้องนำที่มีการบดบึงบางส่วน</p>

^a B คือ ตะกอนที่ต้งน้ำ (bed load), BM คือ ตะกอนวัสดุที่ต้งน้ำ (bed material load)

^b แสดงช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างสมการ

^c อธิบายโดย Steven and Yang (1989) และแสดงไว้ในเว็บไซต์ขององค์กรสำรวจทางธรณีวิทยาสหรัฐ (U.S. Geological Survey) เข้าถึงได้จาก <http://water.usgs.gov/software/seddisch.html>

^d WIHEE: Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering ประเทศจีน

3.2.2. สมการของ Laursen

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทยโดยใช้สมการของ Laursen เป็นพื้นฐาน ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

Laursen (1958) สร้างฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการไหล กับผลการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม ได้ความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 3-3 และมีสมการคำนวณ คือ

$$\bar{C} = \sum p \left(\frac{d}{y}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right) f\left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}\right) \quad (3.1)$$

เมื่อ

\bar{C} = ความเข้มข้นของตะกอน หน่วย เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (เป็นสัดส่วนกับ อัตราส่วน Q_s/Q)

p = สัดส่วนของแต่ละขนาดของตะกอน (fraction of sediment size)

τ'_0 = หน่วยแรงเฉือนของวัสดุ (particle shear) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหน่วยแรงเฉือนทั้งหมด (total shear) และ มีค่าตามสมการ $\tau'_0 = \frac{V^2 d_m^{(1/3)}}{30 y^{(1/3)}}$

τ_c = หน่วยแรงเฉือนวิกฤติของเม็ดวัสดุ เป็นฟังก์ชันขนาดตะกอน = $\phi(d)$ หน่วย ปอนด์/ฟุต²

V = ความเร็วเฉลี่ยการไหล (mean velocity) หน่วย ฟุต/วินาที

y = ความลึกการไหล (depth of flow) หน่วย ฟุต

d = ขนาดของตะกอน หน่วย ฟุต

d_m = ขนาดเฉลี่ยของตะกอน หน่วย ฟุต

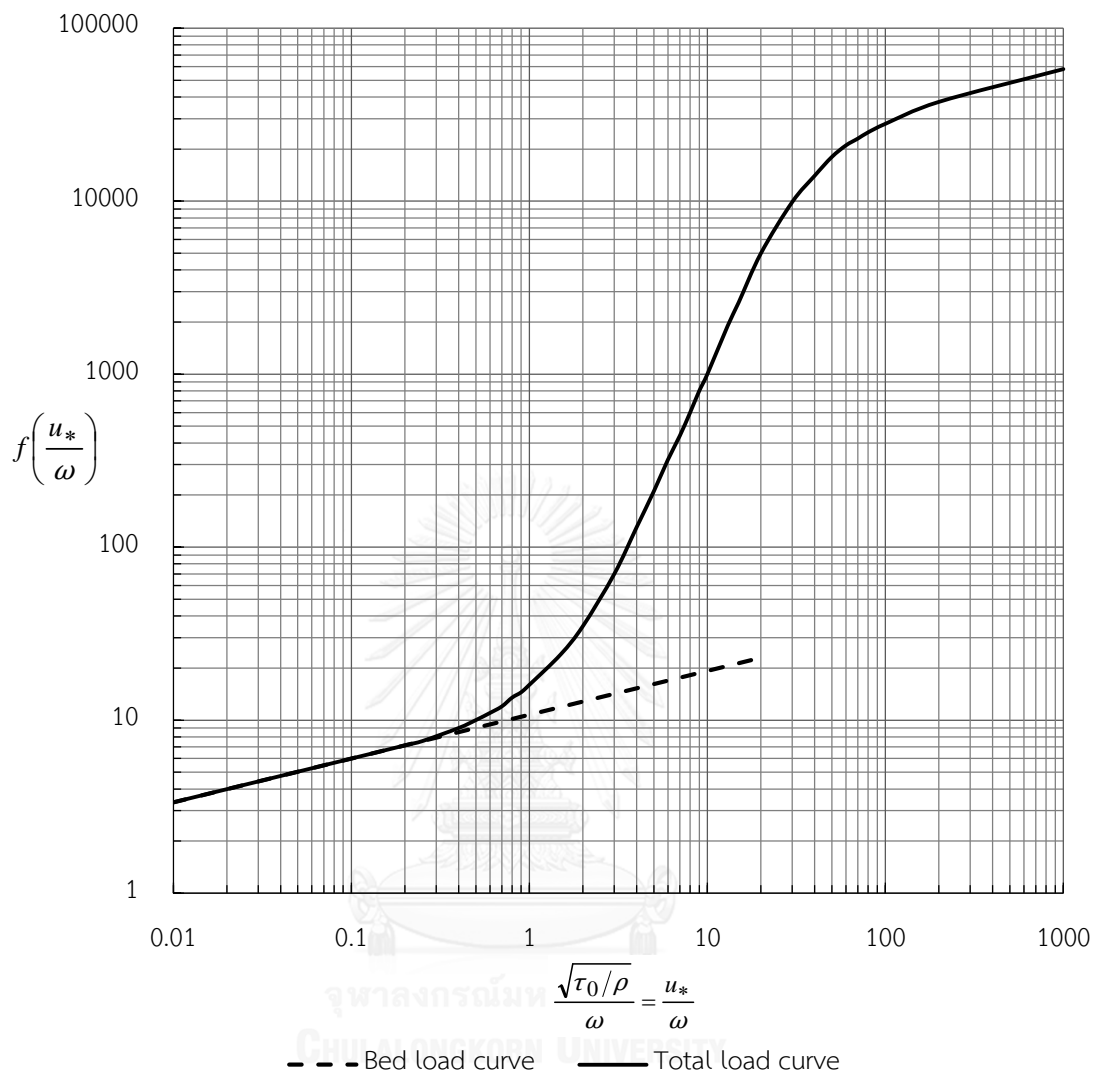
τ_0 = หน่วยแรงเฉือนของพื้นผิวทางน้ำ (boundary shear) = $\gamma y S$ หน่วย ปอนด์/ฟุต²

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ หน่วย สลัก/ฟุต³

$U_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ = ความเร็วเฉือน (shear velocity) = \sqrt{gDS} หน่วย ฟุต/วินาที

ω = ความเร็วการตกของเม็ดตะกอน (fall or settling velocity) หน่วย ฟุต/วินาที อ่านค่าได้จาก รูปที่ 3-4

$f\left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}\right)$ = ฟังก์ชันของ ความเร็วเฉือน ต่อ ความเร็วการตกของเม็ดวัสดุ



รูปที่ 3-3 ค่าฟังก์ชันของ Laursen

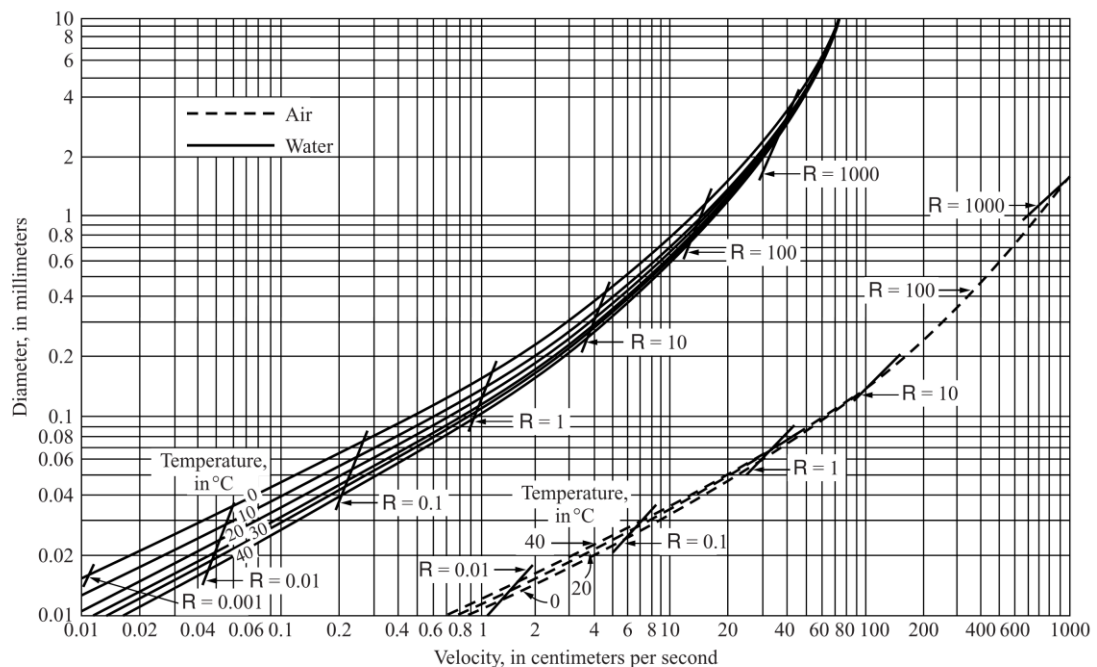
$$\text{sediment load (Ton/day)} = \left(\frac{\bar{C}}{100}, \text{percent}\right) \left(Q, \frac{ft^3}{sec}\right) \left(62.4 \frac{lbs}{ft^3}\right) \left(86400 \frac{sec}{day}\right) \left(\frac{1 \text{ Metric Ton}}{2204.6 lbs}\right) \quad (3.2)$$

หรือ

$$\text{sediment load (Ton/day)} = \left(\frac{\bar{C}}{100}, \text{percent}\right) \left(Q, \frac{m^3}{sec}\right) \left(86400 \frac{sec}{day}\right) \left(1, \frac{Ton}{m^3}\right) \quad (3.3)$$

โดยพจน์ของ $\left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right)$ มีความสำคัญกับการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนท้องน้ำ และพจน์ของ $\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}$ เกี่ยวข้องกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย ความเข้มข้นของตะกอนรวมจึงเป็นผลรวมของความเข้มข้นในแต่ละสัดส่วนขนาดตะกอนที่มีอยู่ (Yang, 1996)

ในการใช้สูตร Laursen (1958) คำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแม่น้ำรวม (total sediment load) จะต้องมีตัวอย่างข้อมูลของวัสดุท้องน้ำ (bed material sample) ที่ดี Laursen กล่าวไว้ว่าถ้าข้อมูลวัสดุท้องน้ำ ไม่ดี จะเป็นเหตุผลหลักที่สำคัญที่จะทำให้ค่าที่คำนวณได้จากสมการมีความคลาดเคลื่อน ตัวอย่างตะกอนท้องน้ำที่เก็บมาจะมาหาขนาดคละของตะกอน โดยแบ่งแต่ละขนาดตะกอนเป็นส่วนๆ (fraction of size) หลายๆ ส่วน โดยไม่จำเป็นจะต้องเป็นสัดส่วนที่เท่ากัน แต่ละสัดส่วนขนาดจะมีขนาดเฉลี่ยของตะกอน (mean size) เป็น d และขนาดเฉลี่ยของตะกอนทั้งหมด เป็น d_m หรือ d_{50} ค่าเฉลี่ยของความเร็วการตกของแต่ละขนาดของตะกอน ให้ใช้ความเร็วการตกของเม็ดวัสดุทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d ที่ตกลงโดยอิสระในน้ำนิ่ง สำหรับขนาดตะกอนทั้งหมดที่เป็นตะกอนเม็ดละเอียดมาก (very fine sediment) $\tau_c = 4d$ ได้ใช้ในสูตรของ Laursen (เสรี จันทโรยธา และ ชัยพันธุ์ รักรวิชัย, 2557)



รูปที่ 3-4 ความเร็วการตกอิสระของเม็ดทรงกลมในน้ำนิ่ง (Vanoni, 2006)

บทที่ 4

การจัดเตรียมข้อมูลและวิธีการศึกษา

ในการศึกษาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม จำเป็นต้องใช้ข้อมูลภาคสนามหรือข้อมูลการสำรวจจริงเพื่อนำมาวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนที่เกิดขึ้น รายละเอียดข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีดังนี้

4.1. การจัดเตรียมข้อมูล

4.1.1. ข้อมูลการสำรวจตะกอนแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537)

การเก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ มีความสลับซับซ้อน และยุ่งยากมากกว่าการเก็บข้อมูลอัตราการไหลของตะกอนแขวนลอย ทำให้ข้อมูลการสำรวจตะกอนท้องน้ำของประเทศไทยมีอยู่อย่างจำกัด ข้อมูลที่นับว่าสมบูรณ์และมีเผยแพร่อยู่ในปัจจุบัน คือ ข้อมูลของ ไพฑูรย์ กิติสุนทร ซึ่งสามารถสืบค้นได้ในวิทยานิพนธ์เรื่อง “การเคลื่อนที่ของตะกอนและปัญหาการเดินเรือในแม่น้ำน่านตอนล่าง” ที่ได้มีการศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนในแม่น้ำน่านตอนล่าง โดยมีการสำรวจคุณสมบัติชลศาสตร์ในลำน้ำน่านตอนล่าง กม.443-438.3 ในช่วงเดือนมิถุนายนถึงธันวาคม 2535 รวมทั้งสิ้น 22 ชุดข้อมูล แบ่งเป็นการสำรวจเฉพาะตะกอนท้องน้ำอย่างเดียว 9 ชุดข้อมูล และการสำรวจที่มีทั้งตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอยอีก 13 ชุดข้อมูล แสดงข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ในตารางที่ 4-1 พร้อมกันนี้ยังได้มีการสำรวจเปอร์เซ็นต์แปรผันของชนิดเม็ดวัสดุท้องน้ำของแม่น้ำน่านตอนล่างอีก 24 ตำแหน่ง เมื่อวันที่ 10 ธันวาคม 2535 ตั้งแต่ กม.407 ถึง กม.477 แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติชลศาสตร์ในลำน้ำน่านตอนล่าง กม.443-438.3 สำรวจเมื่อ มิ.ย.-ธ.ค. 2535
(ไพฑูรย์, 2537)

No	date	Sta. km.	T m	W m	D m	R m	S _f	v m/s	Q cms	Q _s ton/day	Q _b ton/day	d ₅₀ mm
1	20-06-35	443	66.15	53.36	2.56	2.19	0.000069	0.48	70.72	-	3	0.225
2	20-06-35	442	76.70	67.15	2.14	1.92	0.000084	0.48	70.63	-	4	0.330
3	20-06-35	441	70.50	59.83	2.49	2.17	0.000063	0.46	70.83	-	8	0.330
4	04-08-35	443	82.16	70.02	5.43	4.66	0.000091	0.91	354.73	-	15	0.370
5	05-08-35	442	107.01	83.42	5.50	4.43	0.000077	0.81	389.41	-	12	0.470
6	06-08-35	441	87.98	71.96	5.83	4.86	0.000072	0.84	364.97	-	90	0.690
7	06-08-35	440	97.95	80.77	5.22	4.41	0.000079	0.81	355.79	-	6	0.440
8	07-08-35	439.1	104.28	81.32	4.99	4.03	0.000092	0.84	354.94	-	5	-
9	07-08-35	438.3	92.09	84.42	5.10	4.67	0.000074	0.82	357.09	-	63	0.220
10	25-09-35	439.1	107.93	88.74	5.65	4.78	0.000105	0.91	474.76	13224	21	0.210
11	24-09-35	438.3	94.50	86.05	6.03	5.45	0.000058	0.84	441.68	10995	16	0.220
12	25-10-35	443	78.86	67.52	4.94	4.28	0.000012	0.43	147.01	465	~0	
13	26-10-35	442	101.30	88.73	4.57	4.08	0.000014	0.45	187.20	856	~0	
14	26-10-35	441	85.69	72.42	5.23	4.49	0.000012	0.48	188.80	735	~0	
15	27-10-35	440	96.62	76.83	4.75	3.90	0.000014	0.49	184.61	715	~0	
16	27-10-35	438.3	91.27	84.64	4.90	4.53	0.000010	0.45	188.36	732	~0	
17	07-12-35	443	83.07	71.62	5.86	5.08	0.000087	0.85	368.18	3491	17	0.300
18	08-12-35	442	107.40	87.81	4.95	4.14	0.000089	0.74	332.07	3256	64	0.215
19	05-12-35	441	87.24	72.94	5.10	4.34	0.000096	0.82	315.41	2675	13	0.690
20	08-12-35	440	99.00	80.86	4.98	4.19	0.000098	0.79	330.59	3442	35	0.220
21	09-12-35	439.1	103.74	78.65	4.81	3.83	0.000102	0.76	304.37	2363	53	0.240
22	09-12-35	438.3	91.70	82.97	5.05	4.58	0.000077	0.72	307.22	2691	25	0.220

หมายเหตุ

Sta. หมายถึง ตำแหน่งหน้าตัดที่ กม.

T = ความกว้างผิวน้ำ

W = ความกว้างประสิทธิผล

D = ความลึกประสิทธิผล

R = รัศมีชลศาสตร์

S_f = ความลาดพลังงานการไหล

V = ความเร็วเฉลี่ยการไหล

Q = อัตราการไหล

Q_b = ปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนท้องน้ำ

Q_s = ปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอน

แขวนลอย

d₅₀ = ขนาดมัธยฐานของเม็ดตะกอนท้องน้ำ

ตารางที่ 4-2 การกระจายขนาดเม็ดวัสดุท้องน้ำของแม่น้ำน่านตอนล่าง สํารวจเมื่อ ธ.ค. 2535
(ไฟฟูรย, 2537)

River km	d_{50} mm	Percent in each classification								
		CG	MG	FG	VFG	VCS	CS	MS	FS	VFS
407	0.23	0.00	0.00	0.00	0.68	0.02	3.80	70.50	24.00	1.00
408	0.48	0.00	0.00	1.50	10.35	8.65	36.50	28.70	10.80	3.50
417	0.30	0.00	0.00	0.00	0.76	0.04	0.00	62.70	30.20	6.30
423	0.20	0.00	0.00	0.00	0.19	0.01	3.60	55.20	39.70	1.30
429	0.23	0.00	0.00	0.00	0.07	0.03	4.90	60.80	32.60	1.60
432	0.37	0.00	0.00	0.40	3.31	2.19	14.10	55.50	21.90	2.60
435	0.43	0.00	0.00	0.00	0.41	0.19	18.00	64.70	16.50	0.20
438	0.28	0.00	1.50	2.50	3.55	4.95	10.50	50.00	26.00	1.00
439	0.41	0.00	0.00	0.04	0.64	3.31	20.50	56.00	18.50	1.00
440	0.40	0.00	0.00	0.00	0.21	1.79	18.00	60.00	19.70	0.30
441	0.36	0.00	0.00	4.00	11.38	14.62	12.00	35.50	22.20	0.30
442	0.36	0.00	3.00	1.50	4.00	5.00	11.50	50.00	24.40	0.60
443	0.31	0.00	0.00	2.00	3.88	6.62	13.00	52.00	21.50	1.00
444	0.23	0.00	0.00	0.11	1.02	3.96	10.10	60.30	23.90	0.60
447	0.38	0.00	0.00	0.00	0.96	0.04	12.70	67.50	18.70	0.10
450	0.44	0.00	0.00	0.00	1.97	5.13	31.10	50.00	11.80	0.00
453	0.41	0.00	0.00	0.00	0.92	1.98	26.00	57.90	13.20	0.00
456	0.31	0.00	0.00	0.00	0.02	0.18	0.50	60.60	37.30	1.40
459	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	57.80	41.00	1.20
462	0.33	0.00	0.00	0.00	0.07	0.03	12.60	69.70	17.50	0.10
465	0.32	0.00	0.00	0.00	0.60	0.10	14.30	65.90	18.30	0.80
468	0.28	0.00	0.00	0.00	0.38	0.32	63.00	31.30	5.00	0.00
471	0.23	0.00	0.00	2.70	22.08	1.32	5.00	41.40	25.50	2.00
477	0.24	0.00	0.00	0.00	13.23	8.37	9.50	42.90	23.40	2.60
Max.	0.48	0.00	3.00	4.00	22.08	14.62	63.00	70.50	41.00	6.30
Avg.	0.32	0.00	0.19	0.61	3.36	2.87	14.63	54.45	22.65	1.23
Min.	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.70	5.00	0.00
Std.	0.08	0.00	0.66	1.10	5.37	3.66	13.57	11.30	8.68	1.39

หากเปรียบเทียบตำแหน่งหน้าตัด กม. กับ สถานีวัดน้ำท่าของกรมชลประทาน พบว่า กม. 422 (อ.ชุมแสง) ใกล้เคียงกับสถานี N.14A ตำแหน่งกม.448 (อ.บางมูลนาก) ใกล้เคียงสถานี N.8 ตำแหน่ง กม.456 ใกล้เคียงสถานี N.8A และตำแหน่งกม.475 (อ.ตะพานหิน) ใกล้เคียงสถานี N.10A

4.1.2. ข้อมูลอุทกวิทยา

ข้อมูลทางอุทกวิทยาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ข้อมูลการสำรวจจริงของปริมาณน้ำท่า และข้อมูลการสำรวจตะกอน

1) ข้อมูลการสำรวจตะกอนแขวนลอย

กลุ่มงานตะกอนและคุณภาพน้ำ ส่วนอุทกวิทยา สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา เป็นหน่วยงานหลักในการดำเนินงาน การวางแผนเครือข่ายสถานีสำรวจตะกอนแขวนลอย การจัดทำฐานข้อมูล รวมทั้งการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลตะกอนแขวนลอย ซึ่งดำเนินการสำรวจและประมวลผลข้อมูล ตะกอนแขวนลอย โดยศูนย์อุทกวิทยาและบริหารน้ำภาค ในการศึกษาวิจัยอาศัยข้อมูลจาก ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนบน และ ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนล่าง ได้แก่ ข้อมูลการสำรวจตะกอน (อท.50) ซึ่งจะประกอบด้วย ความเข้มข้นของตะกอนที่วัดได้โดยน้ำหนัก (ppm) และปริมาณตะกอนแขวนลอยที่คำนวณได้ (ตัน/วัน) โดยมีขั้นตอนการจัดทำข้อมูลดังนี้

- (1) รวบรวมสถานีวัดปริมาณตะกอนแขวนลอยของกรมชลประทาน
- (2) คัดเลือกสถานีวัดปริมาณตะกอนแขวนลอย โดยพิจารณาจากช่วงความยาวของข้อมูลที่มีการสำรวจ
- (3) รวบรวมข้อมูลการสำรวจตะกอน (อท.50) ของสถานีที่คัดเลือก

ในการศึกษานี้ได้เลือกสถานีที่จะประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทั้งสิ้น 15 สถานี แบ่งเป็นสถานีในกลุ่มน้ำปิง 4 สถานี, กลุ่มน้ำวัง 4 สถานี, กลุ่มน้ำยม 3 สถานี และกลุ่มน้ำน่าน 4 สถานี ใช้ข้อมูลการสำรวจของกรมชลประทานในช่วงปีน้ำต่าง ๆ โดยมีจำนวนชุดข้อมูล (จำนวนครั้งการสำรวจ) ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ แสดงไว้ในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 จำนวนชุดข้อมูล (จำนวนครั้งการสำรวจ) ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

สถานี	ช่วงข้อมูล (ปีน้ำ)	จำนวนชุดข้อมูล
P.1	2536-2557	609
P.4A	2550-2557	210
P.75	2544-2557	367
P.77	2543-2557	271
W.1C	2550-2557	248
W.3A	2550-2557	222
W.4A	2537-2557	358
W.23	2544-2557	198
Y.1C	2540-2557	395
Y.6	2540-2557	331
Y.14	2544-2557	228
N.7A	2544-2557	310
N.8A	2537-2557	456
N.40	2545-2557	314
N.60	2544-2556	282

(ข้อมูล 1 ปีน้ำ คือข้อมูลตั้งแต่ 1 เม.ย. – 31 มี.ค. ของปีถัดไป)

2) ข้อมูลการสำรวจปริมาณน้ำท่า

ข้อมูลการสำรวจปริมาณน้ำท่าของกรมชลประทานที่ใช้ในการศึกษานี้ คือข้อมูลตารางแสดงสถิติการสำรวจปริมาณน้ำ (อท.1-02) ซึ่งจะประกอบด้วย ค่าระดับน้ำขณะสำรวจปริมาณน้ำ ค่าระดับน้ำเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง ความกว้างผิวน้ำ เนื้อที่รูปตัด ความเร็วเฉลี่ย และอัตราไหลของน้ำ ซึ่งสถานีวัดปริมาณน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษานี้อ้างอิงจากสถานีสถานีวัดปริมาณตะกอนแขวนลอยเป็นหลัก มีขั้นตอนการจัดทำข้อมูลดังนี้

- (1) รวบรวมข้อมูลการสำรวจน้ำท่าของกรมชลประทาน (อท.1-02)
- (2) คัดเลือกชุดข้อมูลการสำรวจน้ำท่าที่มีการสำรวจตะกอนในวันเดียวกัน ของแต่ละสถานี
- (3) ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่มี เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนจากการใส่ค่าตัวเลขที่ไม่ถูกต้องลงในตาราง มีขั้นตอนดังนี้

- ตรวจสอบค่าความกว้างผิวน้ำและเนื้อที่รูปตัด โดยพล็อตลงกราฟคู่กับค่าระดับน้ำ หากมีจุดข้อมูลที่ไม่เป็นไปตามแนวโน้มของจุดข้อมูลส่วนใหญ่ แสดงว่าอาจมีบางตัวเลขไม่ถูกต้อง
- คำนวณความเร็วการไหลจากความสัมพันธ์ $V=Q/A$ ของแต่ละชุดข้อมูล ค่าความเร็วที่คำนวณได้ต้องเท่ากับที่ระบุไว้ในตารางแสดงสถิติการสำรวจ หากไม่เท่าแสดงว่าอาจมีบางตัวเลขไม่ถูกต้อง

4.1.3. คุณสมบัติของวัสดุท้องน้ำ

ข้อมูลวัสดุท้องน้ำที่นำมาใช้ศึกษาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแม่น้ำ ประกอบด้วย ข้อมูลที่ได้จากการออกสำรวจภาคสนามในช่วงวันที่ 25 ถึง 29 ธันวาคม 2558 ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำ เป็นจำนวนทั้งสิ้น 35 ชุดตัวอย่าง จาก 17 หน้าตัดแม่น้ำ โดยศึกษาการกระจายขนาดของเม็ดวัสดุท้องน้ำ ทั้งค่ามัธยฐาน (d_{50}) ของเม็ดวัสดุ ค่าเฉลี่ย (d_m) ของเม็ดวัสดุ และเปอร์เซ็นต์แปรผันของชนิดวัสดุท้องน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของการคำนวณด้วยวิธีลอเรน (Laursen method) และวิธีอื่นๆ ที่ใช้หลักการของ Laursen รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4-4 และแสดงกราฟการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำแม่น้ำปิง วัง ยม และ น่าน ดังรูปที่ 4-1, 4-2, 4-3 และ 4-4 ตามลำดับ

รายละเอียดของการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำแสดงไว้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4-4 สรุปคุณสมบัติตัวอย่างวัสดุท้องน้ำ

ลำดับ	วันที่เก็บ ข้อมูล	สถานี	จำนวน ชุด ตัวอย่าง	ขนาด		ร้อยละของแต่ละช่วงขนาดตะกอน*							
				d_{50} (มม.)	d_m (มม.)	FG	VFG	VCS	CS	MS	FS	VFS	Coarse Silt
1	27-12-58	P.1	1	0.18	0.29	0	0	3.3	11.7	12.6	57.1	12.7	2.6
2	27-12-58	P.4A	1	1.31	1.72	8.1	19.7	35	23.5	10.3	3.5	0	0
3	25-12-58	P.15	3	0.89	1.05	0	8.1	35.4	36.2	17.7	2.6	0	0
4	26-12-58	P.21	1	1.43	1.59	0	35	28.3	19.9	16.8	0	0	0
5	27-12-58	P.75	2	0.69	1.38	7.4	15.5	16.7	24.7	27.1	8.6	0	0
6	26-12-58	P.77	4	1.94	2.24	13.5	35.3	23.7	15.5	8.9	3.1	0	0
7	27-12-58	W.1C	2	0.83	1.11	0	14.5	27	36	17.1	4.4	1.0	0
8	26-12-58	W.3A	3	0.87	1.28	0	25.1	20.3	27.9	23.3	3.5	0	0
9	25-12-58	W.4A	3	0.92	1.31	3.4	15.5	27.3	31.5	16.9	5.4	0	0
10	25-12-58	W.23	1	0.34	0.38	0	0	0.5	14.7	68.1	16.7	0	0
11	27-12-58	Y.1C	2	1.26	2.01	16	20.8	22.3	21.9	11.2	5.3	2.6	0
12	28-12-58	Y.6	1	0.60	0.76	0	4.6	20.8	32.7	21	16.4	3.1	1.2
13	28-12-58	Y.14	1	0.15	0.17	0	0	0	0	13.9	51.4	25.3	9.3
14	29-12-58	N.7A	3	0.32	0.46	0	0.7	7.4	16.7	47.1	27.5	0.6	0
15	29-12-58	N.8A	3	0.17	0.25	0	0	0	11.2	17.7	47.9	22	1.2
16	28-12-58	N.40	1	0.13	0.13	0	0	0	0	4	45.9	35.8	14.3
17	28-12-58	N.60	3	0.38	0.59	0	4.2	8.5	19.2	55.3	12.8	0	0

*การจำแนกขนาดตะกอน หรือการแบ่งช่วงลักษณะตะกอน แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของเม็ดวัสดุท้องน้ำ พบว่า ค่ามัธยฐาน (d_{50}) ของเม็ดวัสดุ มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย (d_m) ของเม็ดวัสดุ โดยค่าเฉลี่ยของเม็ดวัสดุ หรืออาจเรียก ค่าเฉลี่ยของ ตะกอนจะมีค่าสูงกว่าค่ามัธยฐานของตะกอนเล็กน้อย หากพิจารณาคูณสมบัติตัวอย่างวัสดุท้องน้ำแยก ตามสถานีในแต่ละลุ่มน้ำ มีดังต่อไปนี้

ค่าเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำของแม่น้ำปิงมีค่ากระจายเป็นช่วงกว้างตั้งแต่ 0.29-2.24 มม. โดยที่ สถานี P.1 มีขนาดเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 0.29 มม. ส่วนใหญ่เป็นทรายละเอียด (fine sand) ส่วนสถานี P.77 แม่น้ำแม่ทาซึ่งเป็นลำน้ำสาขาของแม่น้ำปิง พบขนาดเฉลี่ยของตะกอนสูงสุด คือ 2.24 มม. ส่วน ใหญ่เป็นกรวดละเอียดมาก (very fine gravel) รองลงมาคือสถานี P.21 แม่น้ำแม่ริมซึ่งเป็นลำน้ำ สาขาของแม่น้ำปิงเช่นกัน พบขนาดเฉลี่ยของตะกอน 1.59 มม. ส่วนใหญ่เป็นกรวดละเอียดมาก

เช่นเดียวกัน ส่วนสถานี P.15 ซึ่งตั้งอยู่ในตำแหน่งของแม่น้ำปิงตอนล่าง ส่วนใหญ่พบตะกอนในช่วงของทรายหยาบ (coarse sand) ในสัดส่วนพอ ๆ กับ ทรายหยาบมาก (very coarse sand) และมีขนาดเฉลี่ยของตะกอน 1.05 มม.

ผลการวิเคราะห์ขนาดวัสดุท้องน้ำของแม่น้ำวัง พบว่า มีขนาดเฉลี่ยของตะกอนอยู่ในช่วง 0.38-1.31 มม. โดยที่สถานี W.23 มีขนาดเฉลี่ยของตะกอนต่ำกว่าสถานีอื่น ๆ ในลุ่มน้ำ และส่วนใหญ่เป็นขนาดทรายกลาง (medium sand) ส่วนอีก 3 สถานีที่เหลือล้วนมีตะกอนส่วนใหญ่อยู่ในช่วงทรายหยาบ (coarse sand)

ผลการวิเคราะห์ขนาดวัสดุท้องน้ำของแม่น้ำยม พบว่า แต่ละสถานีมีลักษณะวัสดุท้องน้ำที่ค่อนข้างแตกต่างกัน โดยที่สถานี Y.1C มีขนาดตะกอนเฉลี่ย 2.01 มม. ซึ่งมากกว่าสถานีอื่น ๆ ในลุ่มน้ำเดียวกัน ลักษณะตะกอนที่พบมีทั้งทรายหยาบ ทรายหยาบมาก และ กรวดละเอียดมาก ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ที่สถานี Y.6 มีขนาดเฉลี่ยของตะกอน 0.76 มม. ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงขนาดของทรายหยาบ และที่สถานี Y.14 มีขนาดเฉลี่ยของตะกอนน้อยสุด คือ 0.17 มม. ตะกอนส่วนใหญ่เป็นทรายละเอียด (fine sand) โดยตะกอนขนาดใหญ่สุดที่พบที่สถานีนี้อยู่ในช่วงของทรายกลางเท่านั้น

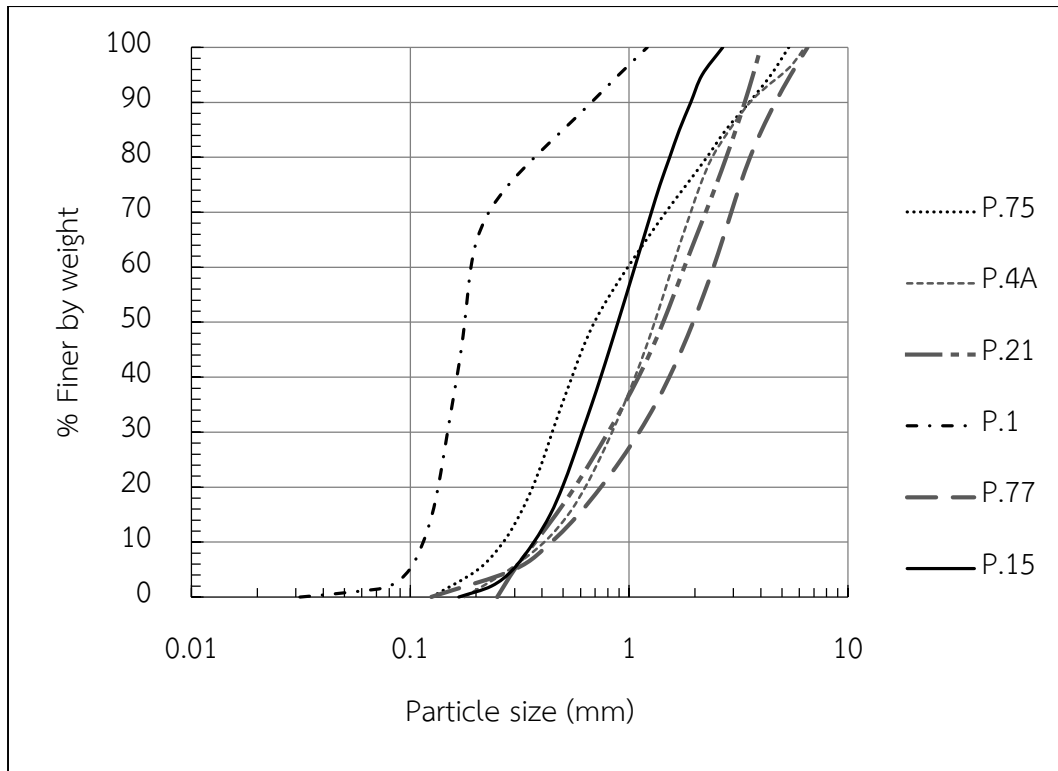
ผลการวิเคราะห์ขนาดวัสดุท้องน้ำของแม่น้ำน่าน พบว่า ที่สถานี N.40 แม่น้ำแควน้อยซึ่งเป็นลำน้ำสาขาของแม่น้ำน่าน มีขนาดเฉลี่ยของตะกอนน้อยสุด คือ 0.13 มม. ส่วนใหญ่เป็นทรายละเอียด ที่สถานี N.7A และ N.60 มีขนาดเฉลี่ยของตะกอนใกล้เคียงกัน คือ 0.46 และ 0.59 ตามลำดับ ซึ่งตะกอนส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของทรายกลาง ส่วนสถานี N.8A มีขนาดเฉลี่ยของตะกอน 0.25 มม. ส่วนใหญ่เป็นทรายละเอียด

สรุปค่าเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ (d_m) แต่ละแม่น้ำ ได้ดังตารางที่ 4-5

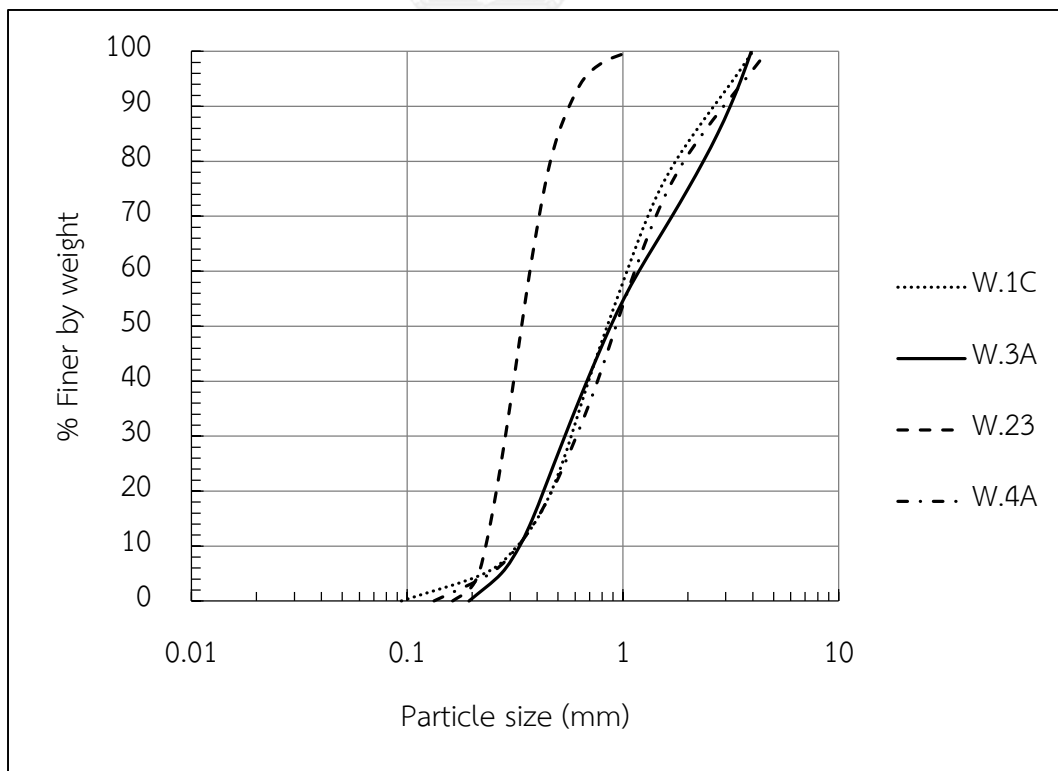
ตารางที่ 4-5 สรุปค่าเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ (d_m)

แม่น้ำ	ช่วงขนาด (d_m), มม.
ปิง	0.29 – 2.24
วัง	0.38 – 1.31
ยม	0.17 – 2.01
น่าน	0.13 – 0.59

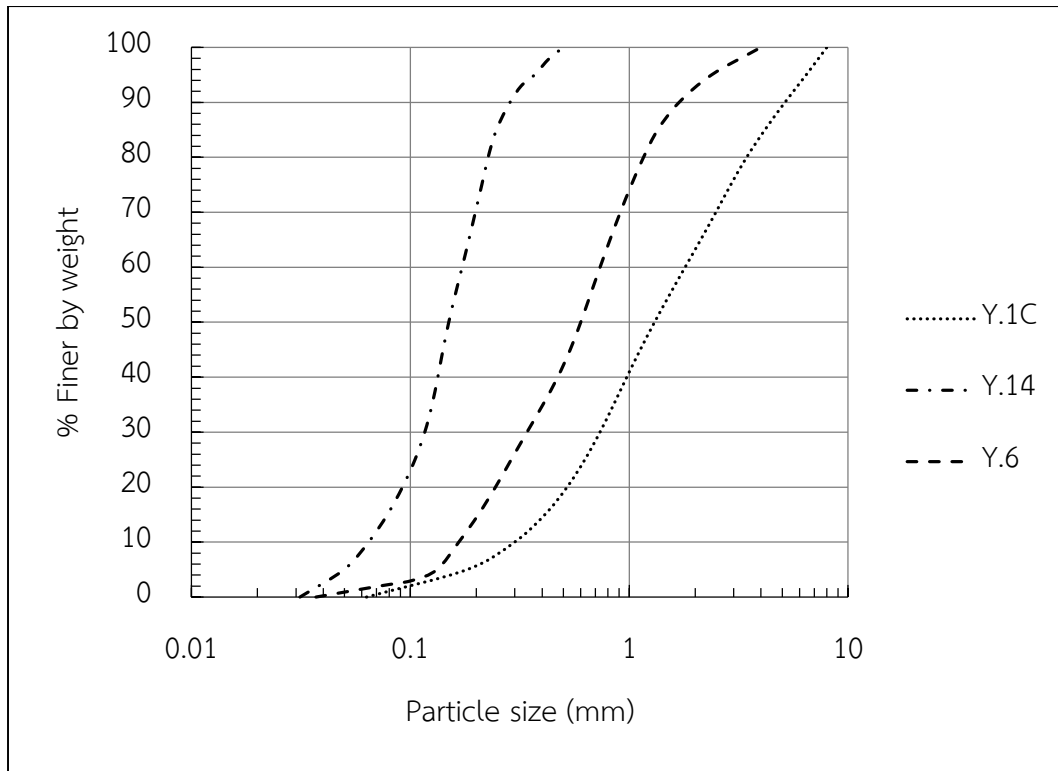
สำหรับผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำของทั้ง 35 ชุดตัวอย่างได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค



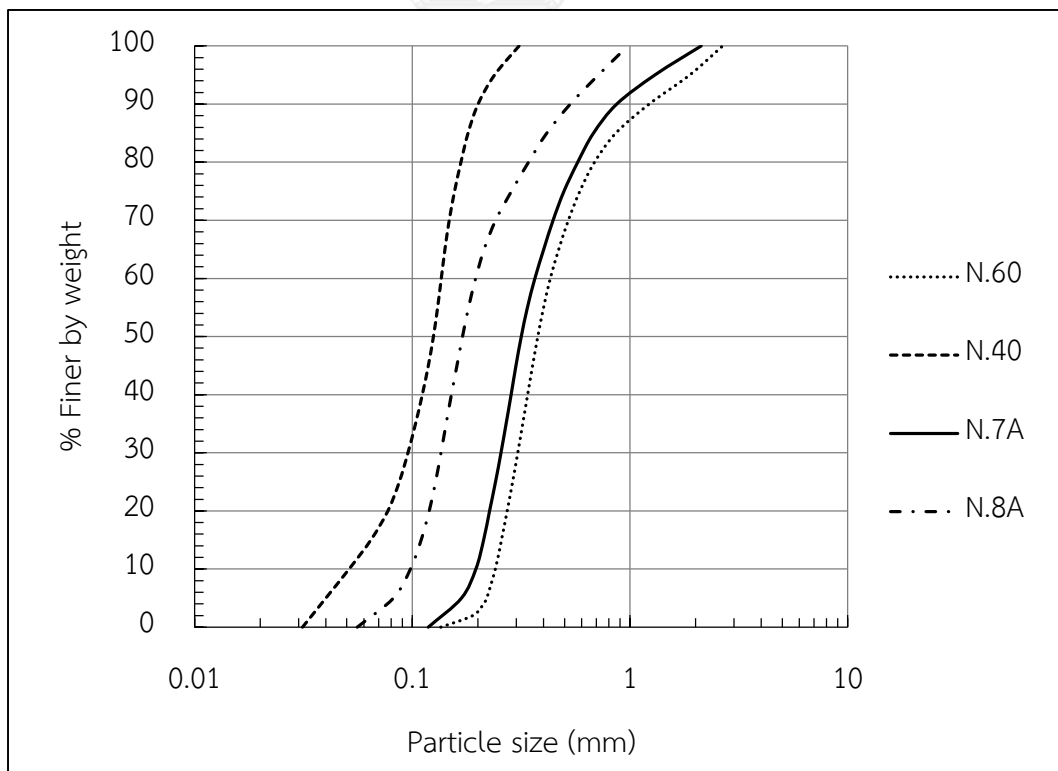
รูปที่ 4-1 กราฟการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำแม่น้ำปิง



รูปที่ 4-2 กราฟการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำแม่น้ำวัง



รูปที่ 4-3 กราฟการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำแม่น้ำยม



รูปที่ 4-4 กราฟการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำแม่น้ำน่าน

จากรูปที่ 4-1 กราฟการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำแม่น้ำปิง สังเกตว่าที่สถานี P.1 มีขนาดตะกอนที่เล็กกว่าสถานีอื่น ๆ ในลุ่มน้ำเดียวกัน โดยลำน้ำสาขาแม่แตง (P.4A), แม่ริม (P.21) และแม่ทา (P.77) พบการกระจายขนาดเป็นช่วงกว้าง โดยขนาดเฉลี่ยของตะกอนจะมีค่าสูงกว่าขนาดเฉลี่ยของสถานีบนลำน้ำหลักแม่ปิง สำหรับแม่น้ำวัง รูปที่ 4-2 เห็นได้ว่า สถานี W.1C, W.3A และ W.4A มีการกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำในลักษณะเดียวกัน มีเพียงสถานี W.23 ที่มีขนาดตะกอนเล็กกว่าสถานีอื่น ๆ ในลุ่มน้ำเดียวกัน ส่วนรูปที่ 4-3 แม่น้ำยม การกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำมีลักษณะที่แตกต่างกันไปในแต่ละสถานี และรูปที่ 4-4 แม่น้ำน่าน จะเห็นว่าสถานี N.40 ลำน้ำสาขาแม่น้ำแควน้อย มีขนาดตะกอนเล็กที่สุด

4.1.4. ข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็น

ในทางน้ำเปิดธรรมชาตินั้น คุณสมบัติของหน้าตัดต่าง ๆ ต้องได้รับมาจากการทำสำรวจหน้าตัดที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วหน้าตัดดังกล่าวมักจะมีการตั้งจุดวัดหรือสถานีที่แน่นอน ซึ่งสถานีเหล่านี้ อาจจะใช้เป็นสถานีวัดระดับน้ำเป็นประจำก็ได้ เพราะมีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของหน้าตัดแล้ว หากหน้าตัด 2 หน้าตัดถูกกำหนดขึ้น ก็จะทราบค่าระยะทาง Δx อย่างแน่นอน (เสรี จันทรโยธา และ ชัยพันธุ์ รักรวิชัย, 2556)

วิธีขั้นตอนมาตรฐานเป็นวิธีที่เหมาะสมกับทางน้ำเปิดไม่คงรูป (non-prismatic channel) หรือทางน้ำเปิดธรรมชาติ (natural channel) เพราะสามารถกำหนดสถานีสำหรับหาคุณสมบัติของหน้าตัดได้ ในการคำนวณระดับผิวน้ำรูปตัดการไหล (flow profile) เพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ Manning's n ที่เหมาะสม จึงใช้วิธีขั้นตอนมาตรฐาน ซึ่งใช้สมการของ Manning ในการคำนวณความลาดชันพลังงานการไหล (energy slope, S) โดยค่าความลาดชันพลังงานนี้ เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในสมการคำนวณของ Laursen เพื่อหาค่าหน่วยแรงเฉือนของพื้นผิวทางน้ำ (boundary shear)

สำหรับการคำนวณการไหลในทางน้ำเปิดกรณีการไหลแบบคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา และไม่เปลี่ยนแปลงกับระยะทาง (steady and uniform flow) มีสมการคำนวณ คือ

จากสมการแมนนิง (Manning formula)

$$Q = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{n} \quad (4.1)$$

เมื่อ

Q คือ อัตราการไหล
 A คือ พื้นที่หน้าตัด

R	คือ	รัศมีชลศาสตร์ (hydraulic radius, $R=A/P$)
P	คือ	เส้นขอบเปียก (wetted perimeter)
S	คือ	ความลาดชันพลังงาน
n	คือ	สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง

กรณีการไหลแบบคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา และเปลี่ยนแปลงกับระยะทาง (steady and non-uniform flow) ซึ่งใช้เฉพาะการไหลเปลี่ยนแปลงช้า (gradually varied flow) มีสมการคำนวณคือ

$$WS.EL._1 + \frac{V_1^2}{2g} = WS.EL._2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (4.2)$$

$$h_f = \bar{S}_f \Delta x = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \Delta x \quad (4.3)$$

$$\bar{S}_f = \frac{n^2}{2} \left[\frac{Q^2}{A_1^2 R_1^{4/3}} + \frac{Q^2}{A_2^2 R_2^{4/3}} \right] \quad (4.4)$$

แทนค่า (4.4) ใน (4.2) จะได้

$$WS.EL._1 + \frac{V_1^2}{2g} = WS.EL._2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{n^2}{2} Q^2 \Delta x \left[\frac{1}{A_1^2 R_1^{4/3}} + \frac{1}{A_2^2 R_2^{4/3}} \right] \quad (4.5)$$

เมื่อ

$WS.EL.$ คือ ระดับน้ำที่สถานี

Δx คือ ระยะทางระหว่างสถานี โดยพิจารณาเฉพาะการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทาน (friction loss) และไม่มีกรไหลเข้าทางด้านข้าง (lateral inflow) ตลอดช่วงสถานี

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n)

ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ที่ใช้ในการคำนวณการไหลทางน้ำเปิด ถือเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญ ในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระด้วยวิธีการไหลแบบคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา และเปลี่ยนแปลงกับระยะทาง (steady and non-uniform flow) จากสมการ (4-5) เมื่อแทนค่า $V = Q/A$ จะได้ว่า

$$n = \left[\frac{(WS.EL._1 - WS.EL._2) + \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} \right)}{\frac{\Delta x}{2} Q^2 \left(\frac{1}{A_1^2 R_1^{4/3}} + \frac{1}{A_2^2 R_2^{4/3}} \right)} \right] \quad (4.6)$$

ณัฐวุฒิ เอี่ยมกาญจน์ (2552) ทำการจำลองสภาพน้ำหลากของแม่น้ำปิงช่วงพื้นที่เมืองเชียงใหม่ ด้วยแบบจำลอง HEC-RAS ซึ่งได้พิจารณาหาสัมประสิทธิ์ความขรุขระของบริเวณสถานี P.1 และสถานี P.67 จาก 2 กรณี คือ กรณี steady and uniform flow และ กรณี steady and non-uniform flow พบว่า

- 1) กรณี steady and uniform flow ค่า Manning's n แปรผันตามระดับน้ำหรืออัตราการไหล โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลลดลง และจะเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากที่อัตราการไหลต่ำ ๆ (<200 ลูกบาศก์เมตร/วินาที) เมื่ออัตราไหลมากกว่า 200 ลูกบาศก์เมตร/วินาที ค่า Manning's n จะเริ่มคงที่ ทั้งบริเวณสถานี P.67 และสถานี P.1 โดยมีค่าประมาณ 0.036 และ 0.037 ตามลำดับ ส่วนที่อัตราการไหลต่ำกว่าค่านี้อัตรา Manning's n จะเริ่มมากขึ้นตามอัตราการไหลที่ลดลง ซึ่งที่สถานี P.67 มีค่า Manning's n อยู่ในช่วง 0.03-0.06 ส่วนสถานี P.1 มีความผันแปรของค่า Manning's n มากกว่า โดยอยู่ในช่วง 0.042-0.1
- 2) กรณี steady and non-uniform flow พบว่า Manning's n มีแนวโน้มเหมือนกับกรณี steady and uniform flow แต่จะได้ค่าที่ต่ำกว่า โดยค่า Manning's n จะเริ่มคงที่ตั้งแต่อัตราการไหลประมาณ 100 ลูกบาศก์เมตร/วินาที ขึ้นไป โดยมีค่าประมาณ 0.033 ส่วนที่อัตราการไหลต่ำกว่านี้ มีค่า Manning's n อยู่ในช่วง 0.04-0.06

จากทั้ง 2 วิธี แสดงให้เห็นว่า ค่า Manning's n มีความแปรผันตามระดับน้ำหรืออัตราการไหล โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลลดลง และเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากที่อัตราการไหลต่ำ ๆ การที่ค่า Manning's n ลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นนี้ เนื่องจากการลดลงของผลของแรงเสียดทานที่เกิดมากบริเวณท้องน้ำและขอบด้านข้างของลำน้ำ ทั้งนี้ ในการศึกษาของณัฐวุฒิ (2552) ได้เลือกใช้ค่า Manning's n จากกรณี steady and non-uniform flow เนื่องจากสอดคล้องกับลักษณะการไหลของทางน้ำในธรรมชาติมากกว่า

ในการศึกษาจึงหาค่า Manning's n จากกรณี steady and non-uniform flow โดยอาศัยข้อมูลหน้าตัดสถานีวัดน้ำของกรมชลประทาน ซึ่งแสดงสถานีที่นำมาพิจารณาพร้อมทั้งผลการวิเคราะห์ ในตารางที่ 4-6 โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- (1) จับคู่หน้าตัดที่ต้องการหาค่า Manning's n กับหน้าตัดใกล้เคียงที่มีการสำรวจปริมาณน้ำท่า โดยตั้งสมมติฐานให้ไม่มีลำน้ำไหลเข้า หรือ ลำน้ำไหลออก ตลอดช่วงลำน้ำนั้น
- (2) รวบรวมข้อมูลการสำรวจน้ำท่าของกรมชลประทาน (อท.1-02) ของหน้าตัดที่เลือก
- (3) คัดเลือกหรือจับคู่ชุดข้อมูล ที่มีการสำรวจน้ำท่าในวันเดียวกัน และมีค่าอัตราการไหลที่เท่ากันหรือเกือบเท่ากัน

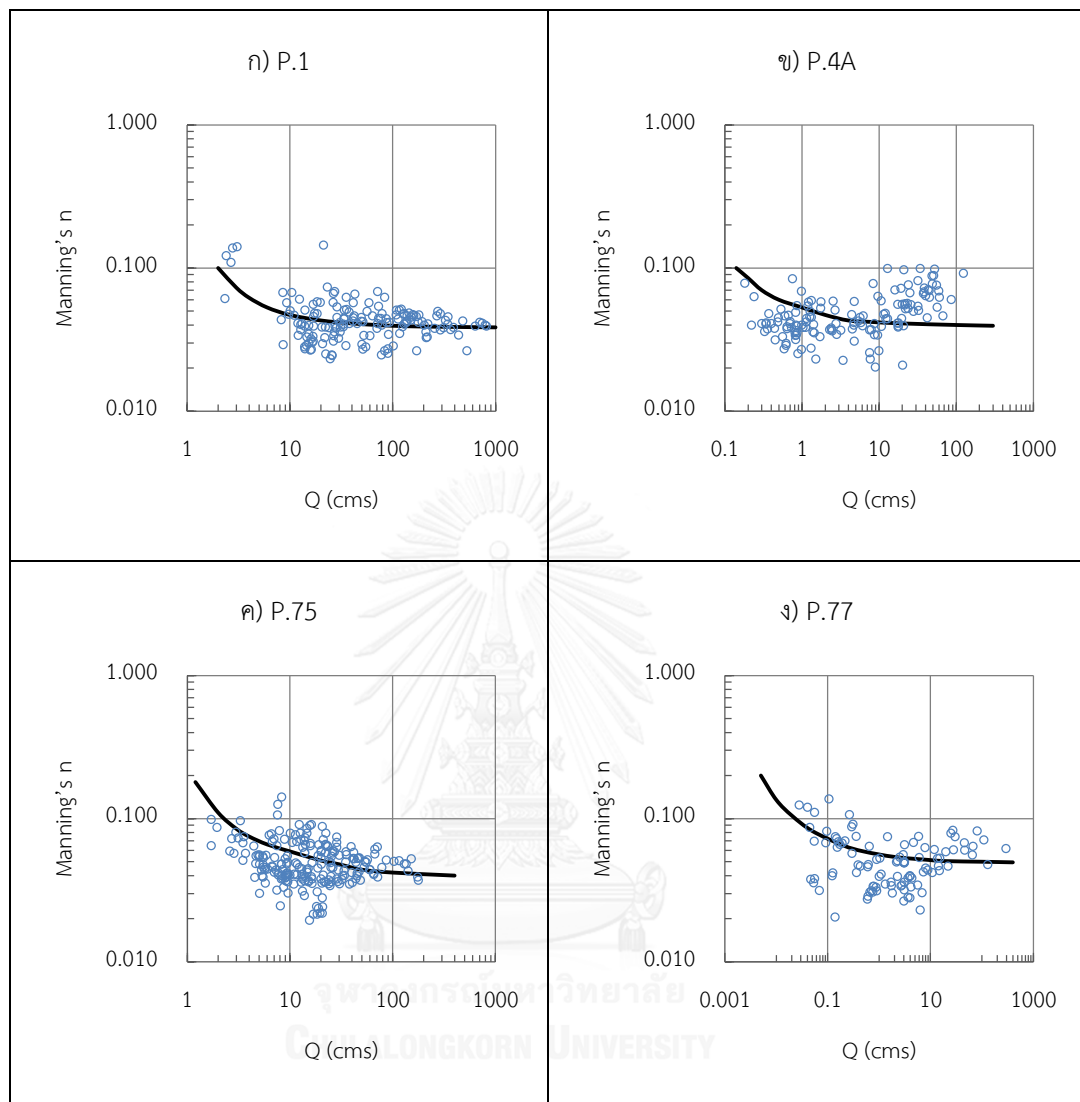
- (4) ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่มีเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนจากการใส่ค่าตัวเลขที่ไม่ถูกต้องลงในตาราง
- (5) ทหาระยะทางระหว่างหน้าตัด 2 หน้าตัดที่เลือกมาพิจารณา โดยอาศัยโปรแกรม Google Earth
- (6) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ด้วยสมการ (4.6)
- (7) ลากเส้นตัวแทนค่า Manning's n ที่แปรผันไปตามค่าอัตราไหล

ตารางที่ 4-6 สรุปรายละเอียดของการคำนวณค่า Manning's n

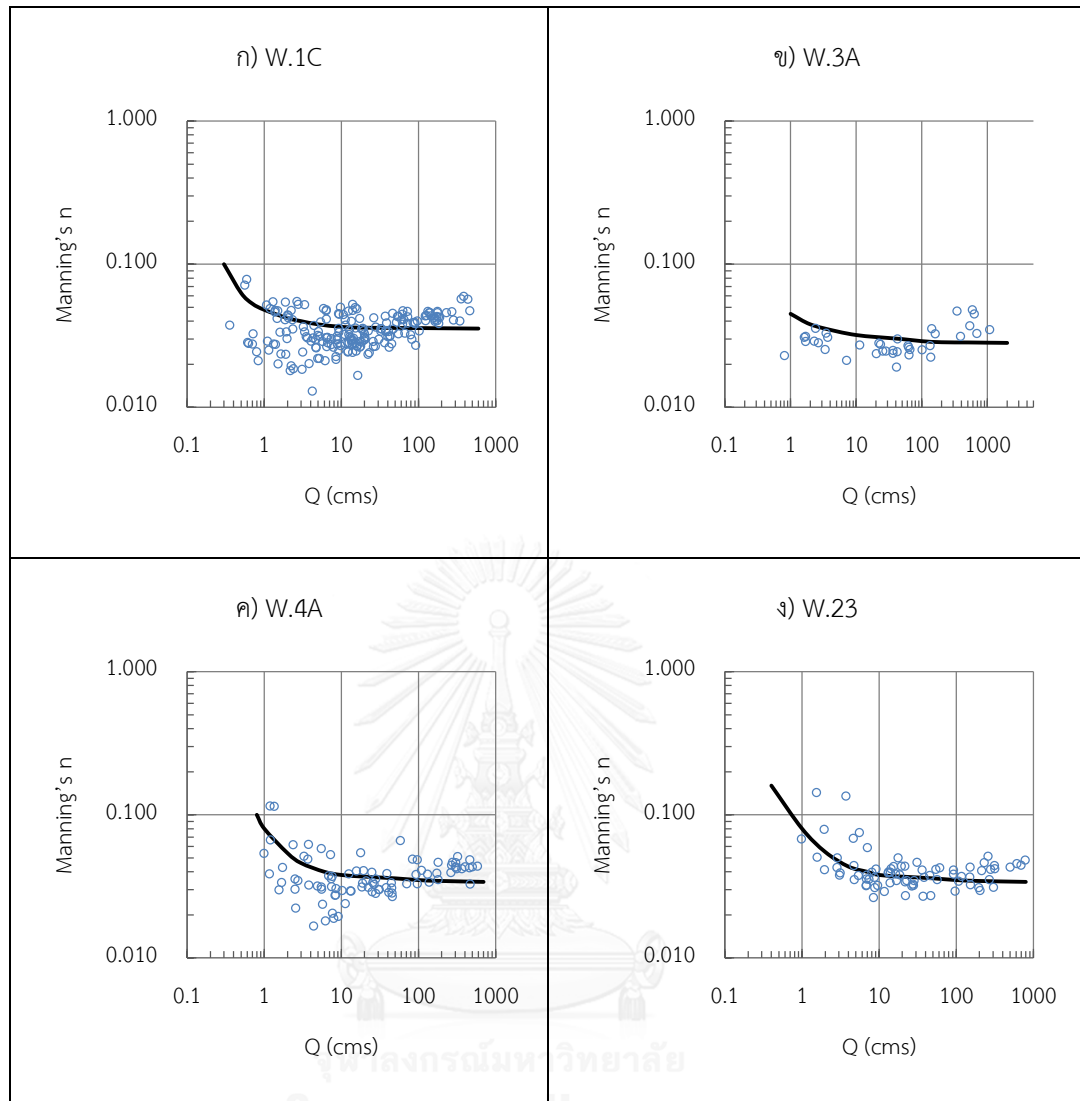
สถานี	หน้าตัด ที่ใช้พิจารณา	ระยะทาง Δx เมตร	ช่วงอัตราไหลที่วิเคราะห์ (ลบ.ม./วินาที)	ช่วงค่า Manning's n	ค่าเฉลี่ย Manning's n
P.1	P.67 – P.1	34,000	2 – 819	0.023 – 0.144	0.045
P.4A	P.65 – P.4A	112,000	0.2 – 125	0.020 – 0.099	0.049
P.75	P.20 – P.75	40,000	2 – 179	0.019 – 0.141	0.051
P.77	P.77 – P.87	31,000	0.03 – 299	0.020 – 0.137	0.053
W.1C	W.1C – W.21	7,000	0.4 – 469	0.013 – 0.078	0.036
W.3A	W.3A – W.23	41,200	1 – 1088	0.019 – 0.048	0.029
W.4A	W.24 – W.4A	26,200	1 – 586	0.017 – 0.115	0.039
W.23	W.23 – W.24	15,000	1 – 791	0.026 – 0.143	0.043
Y.1C	Y.1C – Y.37	112,000	1 – 969	0.015 – 0.063	0.031
Y.6	Y.6 – Y.3A	21,700	1 – 1675	0.022 – 0.085	0.044
Y.14	Y.14 – Y.6	25,200	1 – 1132	0.021 – 0.092	0.038
N.7A	N.74 – N.7A	26,500	75 – 1050	0.012 – 0.063	0.036
N.8A	N.10A – N.8A	21,000	46 – 1362	0.017 – 0.037	0.025
N.40	N.40 – N.22	36,000	2 – 954	0.024 – 0.182	0.046
N.60	N.2B – N. 60	31,000	35 – 1564	0.020 – 0.064	0.029

พร้อมกันนี้ ได้แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ที่อัตราไหลต่าง ๆ ของแต่ละสถานี ดังกราฟในรูปที่ 4-5 ถึง รูปที่ 4-8

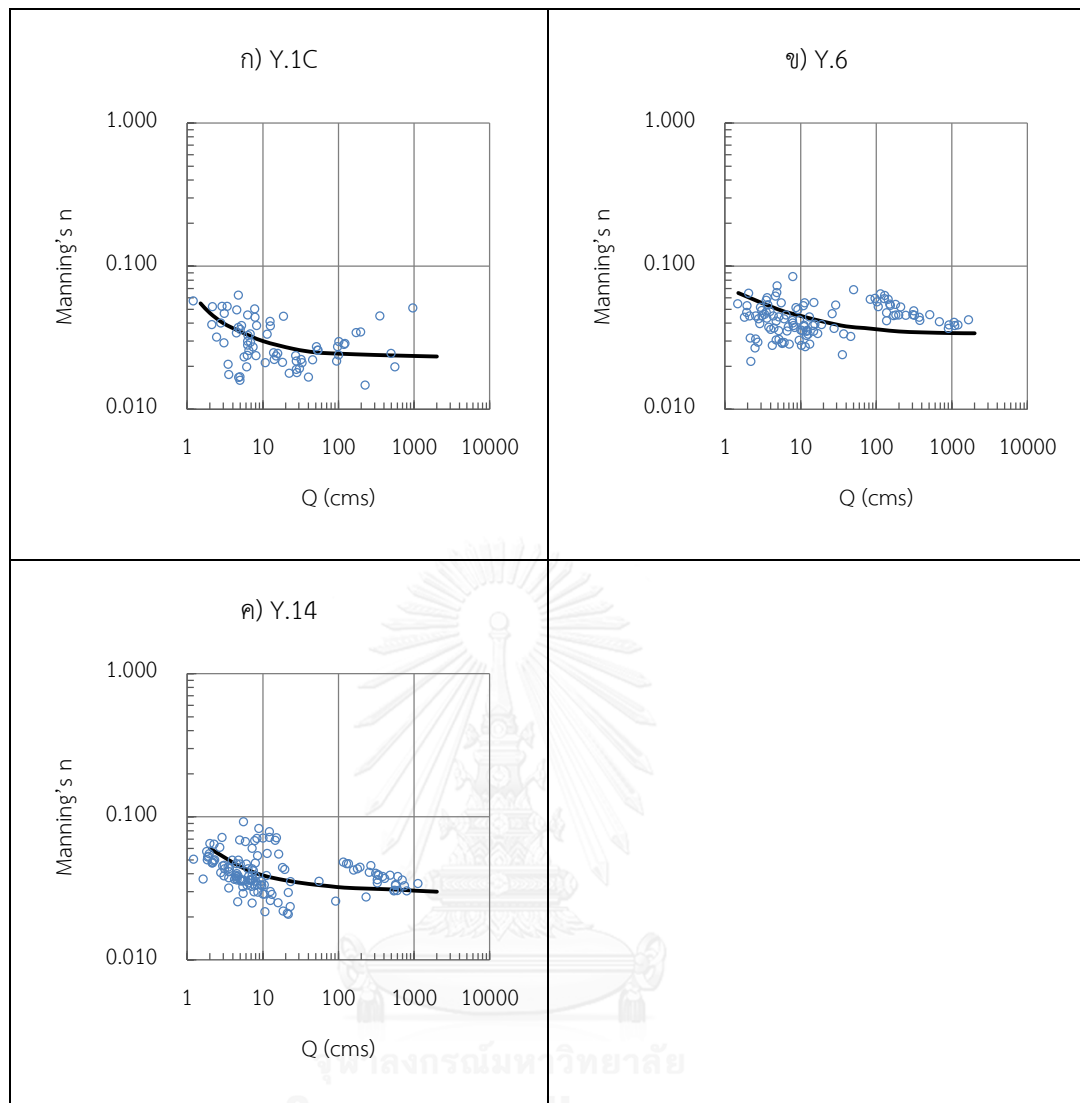
ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ของแต่ละสถานี แสดงได้ดังนี้



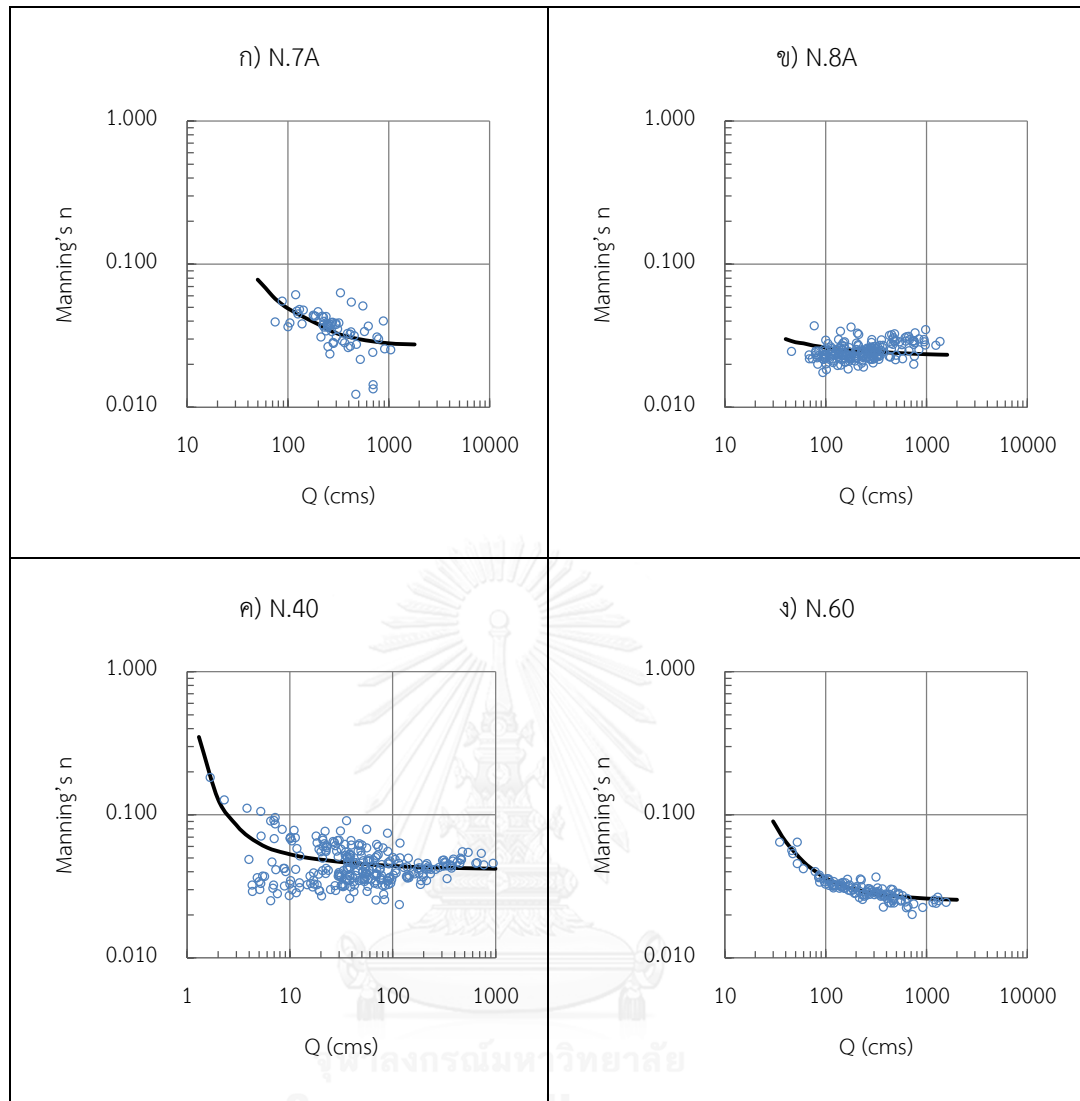
รูปที่ 4-5 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ของสถานีในกลุ่มน้ำปิง



รูปที่ 4-6 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ของสถานีในกลุ่มน้ำวัง



รูปที่ 4-7 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ของสถานีในกลุ่มน้ำยม



รูปที่ 4-8 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน

จากผลการวิเคราะห์ค่า Manning's n ที่ได้แสดงในตารางที่ 4-6 จะเห็นว่า หลายสถานีให้ค่า Manning's n เป็นช่วงกว้าง ยกตัวอย่างสถานี P.1 ที่วิเคราะห์ Manning's n ได้ค่าในช่วง 0.023-0.144 ซึ่งเมื่อเทียบกับค่า Manning's n ที่แนะนำโดย Chow (1959) ของลำน้ำธรรมชาติที่เป็นลำน้ำหลัก (ความกว้างผิวน้ำในขณะมีน้ำหลากมากกว่า 100 ฟุต) กรณีหน้าตัดสม่ำเสมอไม่มีหินใหญ่หรือไม้พุ่ม จะมี Manning's n อยู่ในช่วง 0.025 – 0.060 หรือหากมีหน้าตัดไม่สม่ำเสมอและขรุขระ จะมี Manning's n อยู่ในช่วง 0.035 – 0.100 จะเห็นได้ว่าวิธีนี้อาจให้ค่าที่อยู่นอกช่วงค่าแนะนำทั่วไปของการประมาณค่า Manning's n ได้

อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์นี้เป็นการคำนวณโดยตรงจากข้อมูลที่วัดจริง ย่อมมีความคลาดเคลื่อนจากการวัด และความคลาดเคลื่อนจากวิธีการคำนวณแฝงอยู่ด้วย แต่ก็สามารถให้ค่าที่อยู่ในช่วงที่เป็นไปได้ ดังนั้นจึงสามารถเอาค่า Manning's n ที่ประมาณได้ของทั้ง 15 สถานี ไปใช้สำหรับวิเคราะห์หาค่าความลาดชันพลังงาน (energy slope, S) ด้วยสมการที่ (4.1) ได้

4.2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้แบ่งหลักการวิเคราะห์ได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ การวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยแนวคิดเชิงชลศาสตร์ (hydraulic concept) วิธีที่ใช้คำนวณประกอบด้วย วิธีลอเรน (Laursen method) วิธีดัดแปลงโค้งของลอเรน (modified Laursen curve) และวิธีลอเรนดัดแปลงโดยแมดเดน (Madden's modification of Laursen method) และอีกส่วนหนึ่งคือ การวิเคราะห์อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยด้วยแนวคิดเชิงอุทกวิทยา (hydrologic concept) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยกับอัตราไหลของน้ำ ทั้งนี้ข้อมูลที่น่ามาพิจารณาล้วนเป็นข้อมูลที่สำรวจจริง ทั้งข้อมูลการสำรวจตะกอนรวมของแม่น้ำน่าน โดย ไพฑูรย์ (2537) และข้อมูลการสำรวจตะกอนแขวนลอยของกรมชลประทาน (Q₅₀)

สำหรับการวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยแนวคิดเชิงชลศาสตร์ (hydraulic concept) ได้นำวิธีประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำ ของ Laursen (1958) มาใช้เป็นวิธีการพื้นฐานหลัก ที่จะปรับเปลี่ยนให้สามารถนำไปใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย เนื่องด้วยวิธีการของ Laursen เป็นวิธีการที่ได้พัฒนามาจากการพิจารณาตัวแปร ลักษณะทางชลศาสตร์การไหลของแม่น้ำและตัวแปรลักษณะวัสดุตะกอนท้องน้ำ และในสมการความสัมพันธ์ของ Laursen ตัวแปรต่างๆ ถูกแยกเป็นกลุ่มๆ แต่ละกลุ่มตัวแปรมีผลต่อการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ชัดเจน ที่ผ่านมามีหลายการศึกษา เช่น Madden

Copeland and Thomas รวมทั้ง Kodoatie ที่ได้นำวิธีการของ Laursen มาปรับปรุงเพื่อวิเคราะห์ การเคลื่อนที่ของตะกอนรวม เพราะวิธีการนี้ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรที่แยกเป็น กลุ่มๆได้ และตัวแปรต่างๆนั้นได้พิจารณาครอบคลุมตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของ ตะกอนที่อยู่น้ำอยู่แล้ว อีกเหตุผลหนึ่งที่ว่าการศึกษาได้เลือกวิธีการของ Laursen มาใช้เป็นหลัก เนื่องจาก ไพฑูรย์ (2537) ได้ทดสอบความเหมาะสมของวิธีการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอน รวมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ HEC-6 ผลการทดสอบจากทั้งสิ้น 10 วิธี พบว่า วิธีของ Madden (1963) modification of Laursen's (1958) มีค่าเฉลี่ยของผลรวมความแตกต่างกำลังสองน้อยที่สุด เป็นอันดับสอง ส่วนวิธีของ Madden's (1985) modification (unpublished) of Laursen's (1958) มีค่าเฉลี่ยของผลรวมความแตกต่างกำลังสองน้อยที่สุดเป็นอันดับที่ห้า แสดงว่าหลักการของ Laursen ที่ใช้คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมนี้ สามารถอธิบายข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอน รวมของแม่น้ำน่านได้ จึงสมควรที่จะนำมาใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำใน ภาคเหนือของประเทศไทยเช่นกัน

ในการนี้ได้แบ่งวิธีการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ตามขั้นตอนการศึกษา คือ การดัดแปลง สมการ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537) การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม ของแต่ละหลักการ และการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมโดยรวม 2 หลักการ ด้วยวิธีเชิง ชลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน

ทั้งนี้ ได้สรุปคำจำกัดความและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาไว้ในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 สรุปคำจำกัดความและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

คำภาษาไทย*	คำภาษาอังกฤษ	ตัวแปร	คำจำกัดความ
ปริมาณตะกอนท้องน้ำ	bed load	Q_b	ปริมาณวัสดุท้องน้ำที่เคลื่อนที่โดยการกลิ้ง กิ้ง หรือกระโดดไปบนผิวท้องน้ำ
ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ	suspended bed-material load	Q_{sb}	ปริมาณวัสดุท้องน้ำที่เคลื่อนที่แขวนลอยไปกับน้ำได้
ปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ	total bed-material load	$Q_{bt} = Q_b + Q_{sb}$	ปริมาณตะกอนทั้งหมดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ อาจแขวนลอยอยู่ในน้ำ หรือเคลื่อนที่ไปบนพื้นท้องน้ำก็ได้
ปริมาณตะกอนแขวนลอยส่วนที่ไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำ หรือ ปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ	non-bed-material load	Q_{sw}	ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำ ประกอบด้วยปริมาณตะกอนเซาะล้าง (wash load) และตะกอนจากแหล่งอื่น ๆ ที่ไหลลงสู่ลำน้ำ
ปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม	total suspended load	$Q_{st} = Q_{sb} + Q_{sw}$	ปริมาณตะกอนทั้งหมดที่เคลื่อนที่แขวนลอยไปกับน้ำได้
ปริมาณตะกอนรวม	total load	$Q_t = Q_b + Q_{st} = Q_b + Q_{sb} + Q_{sw}$	ปริมาณตะกอนทั้งหมดที่มีการเคลื่อนที่ในลำน้ำ
ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ได้จากการสำรวจ	observed suspended load	$Q_{so} = Q_{st}$	ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำภาคสนาม
อัตราการไหล	water discharge	Q	อัตราการไหลของน้ำเฉลี่ย

* ปริมาณตะกอน = อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอน

4.2.1. การดัดแปลงสมการ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านของไฟทอรี่ (2537)

เนื่องจากข้อมูลผลการสำรวจจริงของอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมมีเพียงข้อมูลของไฟทอรี่ (2537) จึงใช้ข้อมูลการสำรวจตะกอนแม่น้ำน่านนี้เป็นข้อมูลหลักสำหรับดัดแปลงสมการ Laursen เพื่อให้ได้เส้นฟังก์ชันการเคลื่อนที่ของตะกอนที่สอดคล้องกับชุดข้อมูลแม่น้ำน่านที่มี สำหรับใช้คำนวณในขั้นตอนการศึกษาต่อ ๆ ไป ขั้นตอนการคำนวณมีดังต่อไปนี้

- (1) คำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (Qt) ด้วยวิธีการของ Laursen โดยหาผลรวมการเคลื่อนที่ของแต่ละสัดส่วนขนาดตะกอน ด้วยสมการที่ (3.1) และ (3.2) และความสัมพันธ์รูปที่ 3-3
- (2) เทียบบัญญัติไตรยางศ์หาอัตราการเคลื่อนที่จริงในแต่ละสัดส่วนขนาดตะกอน โดยวัสดุท้องน้ำที่คำนวณในแต่ละจุดข้อมูล จะมีทั้งส่วนที่เคลื่อนที่ได้, $\left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right) > 0$ และส่วนที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่, $\left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right) \leq 0$ หากเทียบบัญญัติไตรยางศ์ได้ถูกต้อง จะได้ผลรวมของอัตราการเคลื่อนที่ของสัดส่วนตะกอนที่เคลื่อนที่ได้ เท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่สำรวจได้จริง
- (3) คำนวณหาค่าฟังก์ชันของความเร็วเฉือน ต่อ ความเร็วการตกของเม็ดวัสดุ ที่ควรจะเป็นด้วยสมการที่ (4.7) โดยใช้ค่าความเข้มข้นที่หาได้จากอัตราการเคลื่อนที่จริงในแต่ละสัดส่วนขนาดตะกอนจากข้อ (2)

โดยการย้ายข้างสมการที่ (3.1) จะได้ว่า

$$f\left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}\right) = \frac{\bar{C}}{\left(\frac{d}{y}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right)} \quad (4.7)$$

- (4) สร้างกราฟความสัมพันธ์ใหม่ ระหว่างค่าฟังก์ชันของความเร็วเฉือน ต่อ ความเร็วการตกของเม็ดวัสดุที่ได้, $f\left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}\right)$ กับ ค่าความเร็วเฉือน ต่อ ความเร็วการตกของเม็ดวัสดุ, $\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}$

4.2.2. การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนรวม

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (Qt) แยกออกเป็น 2 ส่วน คือ การคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำ (Qb) และการคำนวณปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (Qst) การคำนวณด้วยหลักการของ Laursen จะสามารถหาได้ทั้งปริมาณตะกอนท้องน้ำ (Qb) และปริมาณตะกอนรวม

โดยตรง (Q_t) ดังนั้น หากนำค่าปริมาณตะกอนรวมมาลบออกด้วยปริมาณตะกอนท้องน้ำก็จะได้ปริมาณตะกอนแขวนลอย ($Q_t - Q_b = Q_{st}$)

สำหรับการศึกษานี้จะวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลของสถานีวัดน้ำ 15 ตามที่แสดงในหัวข้อ 4.1.1. ทั้งนี้ ข้อมูลการสำรวจที่มีอยู่ มีเฉพาะข้อมูลปริมาณตะกอนแขวนลอยของกรมชลประทาน (Q_{so}) ดังนั้นจึงใช้ค่านี้มาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ได้จากแต่ละวิธีการ ดังต่อไปนี้

1) วิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (Sediment-Discharge Rating Curve)

กรมชลประทาน ดำเนินการสำรวจ วิเคราะห์ และประมวลผลตะกอนแขวนลอย วิธีปฏิบัติโดยทั่วไปจะหาความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยที่เคลื่อนย้ายไปกับปริมาณน้ำ หรือเรียกว่า โค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (sediment-discharge rating curve) ความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนอยู่ในรูปสมการ

$$Q_{st} = kQ^n \quad (4.8)$$

เมื่อ

Q_{st} คือ อัตราการเคลื่อนย้ายของตะกอนรวม (ตัน/วัน)

Q คือ ปริมาณการไหลของน้ำ (ลบ.ม./วินาที)

k และ n เป็นค่าสัมประสิทธิ์และค่ายกกำลังของความสัมพันธ์

ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธี Sediment-discharge rating curve มีดังต่อไปนี้

- (1) รวบรวมข้อมูลการสำรวจอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย (Q_{so}) ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (Q_{st}) ที่วัดได้ และข้อมูลอัตราการไหลของน้ำ (Q) ของแต่ละสถานี
- (2) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q) และอัตราการเคลื่อนที่ของปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (Q_{st}) ที่วัดได้ พร้อมทั้งหาความสัมพันธ์ตามรูปสมการที่ (4.8) ของแต่ละสถานี
- (3) ประเมินค่า Q_{st} ด้วยสมการที่สร้างได้ในข้อ (2) และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่ได้

2) วิธีลอว์เซน (Laursen method)

การคำนวณโดยวิธีลอร์เซน (Laurson method) ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2. วิธีนี้สามารถวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (Q_b) และอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (Q_t) ซึ่งอยู่ในรูปของตะกอนวัสดุท้องน้ำ (Q_{bt}) ดังนั้นตะกอนแขวนลอยที่คำนวณได้จึงเป็นปริมาณตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ (Q_{sb})

ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธีลอร์เซน (Laurson method) มีดังต่อไปนี้

- (1) ประเมินค่า Q_{bt} โดยใช้สมการที่ (3.1) และ (3.2) และกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 3-3
- (2) ประเมินค่า Q_b ด้วยสมการที่ (1.6) ซึ่งเสนอโดย Madden (1985) แสดงสมการได้ดังนี้

$$f\left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}\right)_b = 10.7378\left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega}\right)^{0.25301}$$

- (3) คำนวณ Q_{sb} โดยนำค่า Q_{bt} ที่คำนวณได้ในข้อ (1) มาลบออกด้วย Q_b ที่คำนวณได้ในข้อ (2) และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่ได้

- 3) วิธีดัดแปลงโค้งของลอร์เซน (modified Laurson curve) ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่าน

วิธีคำนวณมีลักษณะเดียวกับวิธีลอร์เซน (Laurson method) แต่ต่างกันที่กราฟความสัมพันธ์ที่ใช้ โดยกราฟนี้ดัดแปลงมาจากข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537) ซึ่งเป็นข้อมูลปริมาณตะกอนรวม (Q_t) ดังนั้นตะกอนแขวนลอยที่คำนวณได้จึงเป็นปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (Q_{st}) แสดงขั้นตอนการคำนวณได้ดังนี้

- (1) ประเมินค่า Q_t โดยใช้สมการที่ (3.1) และ (3.2) และกราฟความสัมพันธ์ที่ได้มาใหม่จากการศึกษาที่ 4.2.1
- (2) ประเมินค่า Q_b ด้วยสมการที่ (1.6) ซึ่งเสนอโดย Madden (1985)
- (3) คำนวณ Q_{st} โดยนำค่า Q_t ที่คำนวณได้ในข้อ (1) มาลบออกด้วย Q_b ที่คำนวณได้ในข้อ (2) และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่ได้

- 4) วิธีลอร์เซนดัดแปลงโดยแมดเดน (Madden's modification of Laurson method)

จากผลการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่ได้จากวิธีดัดแปลงโค้งของลอร์เซน (modified Laurson curve) ในข้อ 3) นำมาหาค่าปรับแก้โดยพิจารณาพจน์ตัวคูณ (Adjusted factor) ในสมการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม โดยในการศึกษาจะพิจารณารายพื้นที่ลุ่มน้ำ

4 กลุ่มน้ำ คือ กลุ่มน้ำปิง กลุ่มน้ำวัง กลุ่มน้ำยม และกลุ่มน้ำน่าน และพิจารณารายพื้นที่ภาค คือ ภาคเหนือ ซึ่งเป็นการพิจารณาทั้ง 4 กลุ่มน้ำในคราวเดียว มีรูปแบบสมการของวิธีนี้ คือ

$$\bar{C} = \left\{ \sum p \left(\frac{d}{y} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1 \right) f \left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega} \right) \right\} (Adj. factor) \quad (4.9)$$

สมการข้างต้นสังเกตได้ว่า ค่าก่อนปรับแก้ต้องมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เมื่อคูณด้วยค่าปรับแก้ (Adj. factor) จึงจะให้ผลการคำนวณใหม่ได้ (หากค่าก่อนปรับแก้เป็นศูนย์ ผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเป็นศูนย์ เท่าเดิม) ดังนั้น การวิเคราะห์ด้วยวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden นี้ จะพิจารณาเฉพาะจุดข้อมูลที่มีการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ ซึ่งจะมีค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (Qt) ก่อนการปรับแก้ที่มากกว่าศูนย์อย่างแน่นอน

ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden มีดังต่อไปนี้

- (1) จากผลการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (Qt) ด้วยวิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เรน (modified Laursen curve) ของแต่ละสถานี พิจารณาเฉพาะจุดข้อมูลที่มีอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่มากกว่าศูนย์
- (2) จัดกลุ่มสถานีตามกลุ่มน้ำที่สถานีนั้นตั้งอยู่ ประกอบด้วย สถานีในกลุ่มน้ำปิง 4 สถานี, กลุ่มน้ำวัง 4 สถานี, กลุ่มน้ำยม 3 สถานี และกลุ่มน้ำน่าน 4 สถานี
- (3) หาค่าสัดส่วนความเข้มข้นตะกอนรวมที่คำนวณได้ (C calculated) ต่อ ความเข้มข้นตะกอนรวมที่สำรวจจริง* (C observed)

(*ความเข้มข้นตะกอนรวมที่สำรวจจริง ในที่นี้หมายถึง ผลรวมความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยที่สำรวจจริง กับ ความเข้มข้นของตะกอนท้องน้ำ ที่คำนวณโดยวิธีลอว์เรน (Laursen method))

- (4) พิจารณาความสัมพันธ์ของเลข Froude number กับค่าสัดส่วนความเข้มข้น (Ratio = C calculated / C observed) เพื่อหาสมการของตัวคูณค่าปรับแก้รายกลุ่มน้ำ
- (5) ประเมินค่า Qt โดยใช้สมการที่ (4.9) และ (3.2) และกราฟความสัมพันธ์ที่ได้มาใหม่จากการศึกษาที่ 4.2.1
- (6) ประเมินค่า Qb ด้วยสมการที่ (1.6) ซึ่งเสนอโดย Madden (1985)
- (7) คำนวณค่า Qst โดยนำค่า Qt ที่ได้ในข้อ (5) มาลบออกด้วย Qb ที่ได้ในข้อ (6) และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่ได้
- (8) ทำซ้ำที่กล่าวมา โดยพิจารณารายพื้นที่ภาคเหนือ

4.2.3. การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยวิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts)

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (Q_t) แยกออกเป็น 2 ส่วน คือ การคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำ (Q_b) และการคำนวณปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (Q_{st}) ดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.2.2 โดยในขั้นตอนการศึกษานี้จะเน้นไปที่การประเมินปริมาณตะกอนแขวนลอยรวมเช่นกัน เพื่อนำมาเป็นค่าเปรียบเทียบกับความคลาดเคลื่อนที่ได้จากวิธีที่ใช้คำนวณ กับผลการสำรวจจริงที่มีอยู่

วิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน อาศัยแนวคิดเชิงชลศาสตร์ (hydraulic concept) โดยวิธีลอว์เรน (Laursen method) มาประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ (Q_{sb}) และนำแนวคิดเชิงอุทกวิทยา (hydrologic concept) มาประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) ซึ่งเป็นตะกอนแขวนลอยส่วนที่ไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำ

เนื่องจากวิธี Laursen ถูกพัฒนามาจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นปริมาณตะกอนรวมที่วิเคราะห์ได้จึงมาจากวัสดุท้องน้ำทั้งหมด (Q_{bt}) ไม่ได้มีตะกอนจากแหล่งที่มาอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย ต่างจากแม่น้ำของจริงซึ่งอาจมีตะกอนที่เกิดจากการชะล้างผิวลำน้ำและผิวดินสองฝั่งเข้าสู่ลำน้ำปนอยู่ด้วยได้ ส่วนผลการสำรวจตะกอนแขวนลอยที่วัดได้ในลำน้ำ จะมีทั้งส่วนของตะกอนที่มาจากวัสดุท้องน้ำ (Q_{sb}) และตะกอนส่วนที่ไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำ (Q_{sw}) วิธีคร่าว ๆ ที่จะแยก Q_{sw} นี้ได้ คือ การหาค่า Q_{sb} ด้วยวิธี Laursen แล้วจึงนำมาหักออกจากผลการสำรวจตะกอนในลำน้ำจริง (Q_{so})

ในการศึกษาจะพิจารณารายพื้นที่ลุ่มน้ำ 4 ลุ่มน้ำ คือ ลุ่มน้ำปิง ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม และลุ่มน้ำน่าน และพิจารณารายพื้นที่ภาค คือ ภาคเหนือ ซึ่งเป็นการพิจารณาทั้ง 4 ลุ่มน้ำในคราวเดียว

ขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน มีดังต่อไปนี้

- (1) จากผลการคำนวณ Q_{sb} ด้วยวิธี Laursen ของแต่ละสถานี พิจารณาเฉพาะชุดข้อมูลที่ได้ Q_{sb} น้อยกว่าค่าที่สำรวจปริมาณตะกอนแขวนลอยได้จริง (Q_{so})
- (2) จัดกลุ่มสถานีตามลุ่มน้ำที่สถานีนั้นตั้งอยู่ ประกอบด้วย สถานีในลุ่มน้ำปิง 4 สถานี, ลุ่มน้ำวัง 4 สถานี, ลุ่มน้ำยม 3 สถานี และลุ่มน้ำน่าน 4 สถานี
- (3) คำนวณค่า Q_{sw} โดยนำค่า Q_{sb} ที่ได้ในข้อ (1) มาหักออกจาก Q_{so}
- (4) พิจารณาความสัมพันธ์ของปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) กับค่าอัตราการไหลเฉลี่ย (Q) เพื่อหาสมการแสดงความสัมพันธ์เชิงอุทกวิทยารายลุ่มน้ำ ในรูปโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (sediment-discharge rating curve)

- (5) ทดสอบการนำไปใช้ของสมการ โดยคำนวณหา Q_{sw} ของแต่ละชุดข้อมูลที่มีอยู่ (จำนวนเท่ากับชุดข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในวิธีลอร์เซน) ด้วยสมการรายลุ่มน้ำที่หาได้
- (6) ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม (Q_{st}) ซึ่งเป็นผลรวมของ Q_{sb} กับ Q_{sw} ของแต่ละชุดข้อมูลที่มีอยู่ และวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้
- (7) ทำซ้ำที่กล่าวมา โดยพิจารณารายพื้นที่ภาคเหนือ

ทั้งนี้ ได้สรุปประเภทของตะกอนที่สามารถหาค่าได้จากการคำนวณทั้ง 5 วิธี เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ค่าประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม แสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละวิธีการคำนวณ

วิธีการคำนวณ	ผลลัพธ์	ปริมาณตะกอนรวม (Q_t)
วิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (Sediment-Discharge Rating Curve)	Q_{st}	$Q_{st}+Q_b$
วิธีลอร์เซน (Laursen method)	Q_{bt} , Q_b , Q_{sb}	$Q_{sb}+Q_b=Q_{bt}$
วิธีดัดแปลงโค้งของลอร์เซน (Modified Laursen curve)	Q_t , Q_b , Q_{st}	$Q_{st}+Q_b$
วิธีลอร์เซนดัดแปลงโดยแมดเดน (Madden's modification of Laursen method)	Q_t , Q_b , Q_{st}	$Q_{st}+Q_b$
วิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts)	Q_{bt} , Q_b , Q_{sb} , Q_{sw}	$(Q_{sb}+Q_b)+Q_{sw}=Q_{bt}+Q_{sw}$

4.2.4. เกณฑ์ทดสอบความถูกต้องของสมการ

ความถูกต้องของการประเมินเป็นสิ่งที่ใช้ค่าประเมินต้องการ ความถูกต้องของการประเมินจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่า ได้ประเมินใกล้เคียงกับค่าจริงมากหรือน้อย หากค่าจริงห่างจากค่าประเมินมาก ความคลาดเคลื่อนของการประเมินจะมีค่าสูง และจะมีค่าต่ำถ้าค่าประเมินใกล้กับค่าจริง

รายละเอียดของค่าวัดความถูกต้องของการประเมินที่ใช้ในการศึกษานี้ มีดังนี้

- 1) พิจารณาสหสัมพันธ์ระหว่างค่าสังเกต (O) และค่าประเมิน (E) ถ้าจุดในแผนภาพการกระจายที่ได้จากการพล็อต (O, E) อยู่ในแนวเส้น 45° แสดงว่าค่าสังเกต และค่าประเมินมีค่าไม่ต่างกันมาก ขนาดของสหสัมพันธ์ระหว่างค่าสังเกต และค่าประเมิน วัดด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เมื่อ $|R|$ มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าค่าประเมินและค่าสังเกตมีค่า

ต่างกันไม่มาก ในทางกลับกัน เมื่อ $|R|$ มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า ค่าประเมินต่างจากค่าจริงมาก ซึ่ง R หาได้จาก

$$R = \frac{\sum(O_t - \bar{O})(E_t - \bar{E}_t)}{\sqrt{\sum(O_t - \bar{O})^2 \sum(E_t - \bar{E}_t)^2}} \quad (4.10)$$

ในทางปฏิบัติจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) หรือที่เรียกว่า R-Squared ซึ่งเป็นตัวสถิติที่ใช้วัดว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้นี้มีความสมรูปกับข้อมูลมากน้อยอย่างไร อย่างไรก็ตาม R-Squared ไม่สามารถบอกได้ว่า ตัวแบบคณิตศาสตร์นี้มีความเหมาะสมดีแล้วหรือไม่

- 2) SSE (sum of the squares of the error) คือค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าไร้หน่วย จึงใช้เปรียบเทียบร้อยละของความคลาดเคลื่อนเมื่อใช้สมการต่าง ๆ กัน มาคำนวณด้วยข้อมูลการสำรวจชุดเดียวกัน มีสมการดังนี้

$$SSE\% = \frac{\sum(Q_{measured} - Q_{computed})^2}{\sum(Q_{measured})^2} \times 100 \quad (4.11)$$

- 3) Discrepancy ratio (R_i) หรือสัดส่วนความคลาดเคลื่อน ใช้บอกความพอดี (goodness of fit) ระหว่างค่าประเมิน กับค่าสำรวจจริง (Yang, 1996) หากค่าที่ได้เท่ากันดีเยี่ยม จะมีค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (\bar{R}_D) เท่ากับ 1 (Kodoatie et al., 2000) มีสมการคำนวณคือ

$$R_i = \frac{C_{ci}}{C_{mi}} = \frac{Q_{ci}}{Q_{mi}} \quad (4.12)$$

$$\bar{R}_D = \frac{\sum_{i=1}^J R_i}{J} \quad (4.13)$$

เมื่อ C_{ci} และ C_{mi} คือ ค่าความเข้มข้นของตะกอนที่ได้จากการประเมิน และการสำรวจจริง ตามลำดับ

Q_{ci} และ Q_{mi} คือ อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้จากการประเมิน และการสำรวจจริง ตามลำดับ

ค่าวัดความถูกต้องที่ใช้กันอยู่จะมีหลายค่าและยังไม่มีผลการวิจัยใดระบุว่าค่าวัดความถูกต้องใดเหมาะสมสุด การเปรียบเทียบวิธีการประเมินทั่วไป จึงมักหาค่าวัดความถูกต้องของการประเมินหลายค่าพร้อมกัน (ทรงศิริ แต่สมบัติ, 2549)

บทที่ 5

การวิเคราะห์และผลการศึกษา

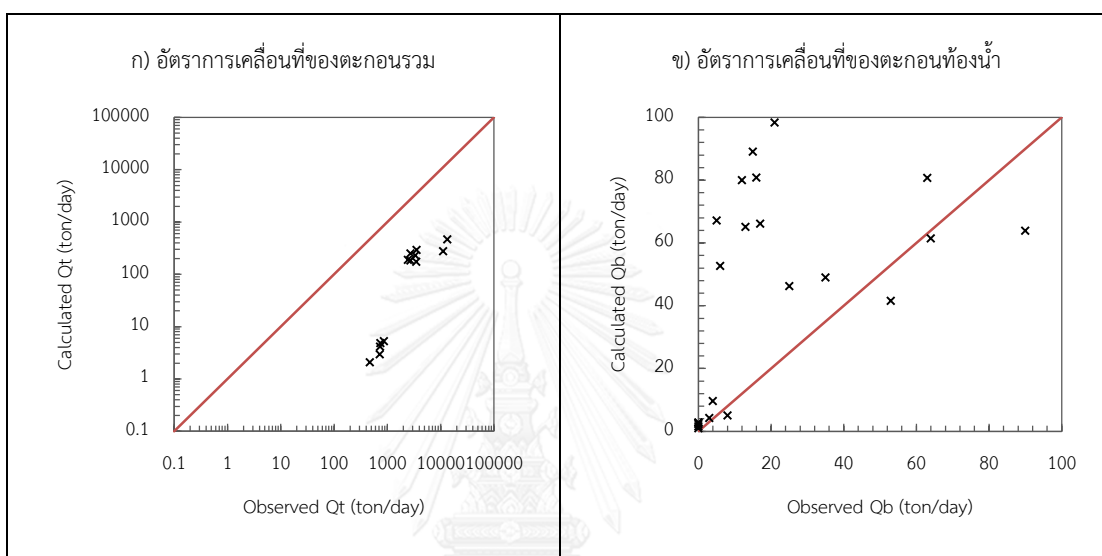
ในการวิเคราะห์อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย แบ่งผลการศึกษาออกเป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ โดยส่วนแรกจะแสดงผลการดัดแปลงสมการ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537) ส่วนที่สองแสดงผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ส่วนที่สามแสดงผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยโดยวิธีต่าง ๆ 4 วิธี ส่วนที่สี่ แสดงผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยวิธีเชิงกลศาสตร์และอุทกวิทยา ร่วมกัน และส่วนสุดท้ายจะเปรียบเทียบผลการประเมินของทุกวิธี สำหรับส่วนที่สอง ส่วนที่สาม และส่วนที่สี่ จะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแทนของสถานีทั้งสิ้น 15 สถานี แบ่งเป็นสถานีในกลุ่มน้ำปิง 4 สถานี (P.1, P.4A, P.75, P.77), กลุ่มน้ำวัง 4 สถานี (W.1C, W.3A, W.4A, W.23), กลุ่มน้ำยม 3 สถานี (Y.1C, Y.6, Y.14) และกลุ่มน้ำน่าน 4 สถานี (N.7A, N.8A, N.40, N.60)

5.1. ผลการดัดแปลงสมการ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537)

จากผลการสำรวจตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอยของไพฑูรย์ (2537) ทั้งสิ้น 22 ชุด ข้อมูล ประกอบด้วยชุดข้อมูลที่มีการสำรวจทั้งตะกอนแขวนลอยและตะกอนท้องน้ำ 13 ชุดข้อมูล และชุดข้อมูลที่มีการสำรวจเฉพาะตะกอนท้องน้ำอีก 9 ชุดข้อมูล เมื่อนำมาคำนวณด้วยวิธีการของ Laursen พบว่า วิธีการของ Laursen ได้ค่าการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่น้อยกว่าจริง (underestimate) โดยมีค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) 92.7% เมื่อพิจารณาเฉพาะอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ พบว่าส่วนใหญ่เป็นการประเมินค่าได้สูงกว่าจริง (overestimate) มีค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) คิดเป็น 148% แสดงการเปรียบเทียบผลการสำรวจจริง และผลการคำนวณที่ได้ ดังรูปที่ 5-1

เนื่องจากข้อมูลการสำรวจตะกอนท้องน้ำของแม่น้ำน่านมีค่อนข้างจำกัด ไพฑูรย์ (2537) จึงอาศัยการทดสอบความเหมาะสมของวิธีการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมทั้งสิ้น 10 วิธี ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ HEC-6 ผลการทดสอบพบว่า วิธีการของ Meyer-Peter and Müller มีค่าเฉลี่ยของผลรวมความแตกต่างกำลังสอง (sum of square of difference) น้อยที่สุด คิดเป็น 3607 ตัน/วัน รองลงมาคือวิธีของ Madden (1963) modification of Laursen's (1958) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของผลรวมความแตกต่างกำลังสอง (sum of square of difference) คิดเป็น 4174 ตัน/วัน ส่วนน้อยเป็นอันดับที่ 5 คือวิธีของ Madden's (1985) modification (unpublished) of Laursen's (1958) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของผลรวมความแตกต่างกำลังสอง (sum of square of difference)

คิดเป็น 4464 ตัน/วัน จะเห็นได้ว่าวิธีของ Madden (1963) และ Madden (1985) มีค่าเฉลี่ยของผลรวมความแตกต่างกำลังสองน้อยที่สุดไม่แตกต่างจากวิธีอื่น ๆ มากนัก โดยทั้ง 2 วิธีต่างก็ใช้วิธีการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำเช่นเดียวกับของ Laursen (1958) ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงจะใช้วิธีการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำด้วยวิธีลอเรน (Laursen method) เช่นกัน เนื่องจากเป็นวิธีซึ่งได้มาจากการวัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งให้ความแม่นยำของการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำได้ดีในระดับหนึ่ง

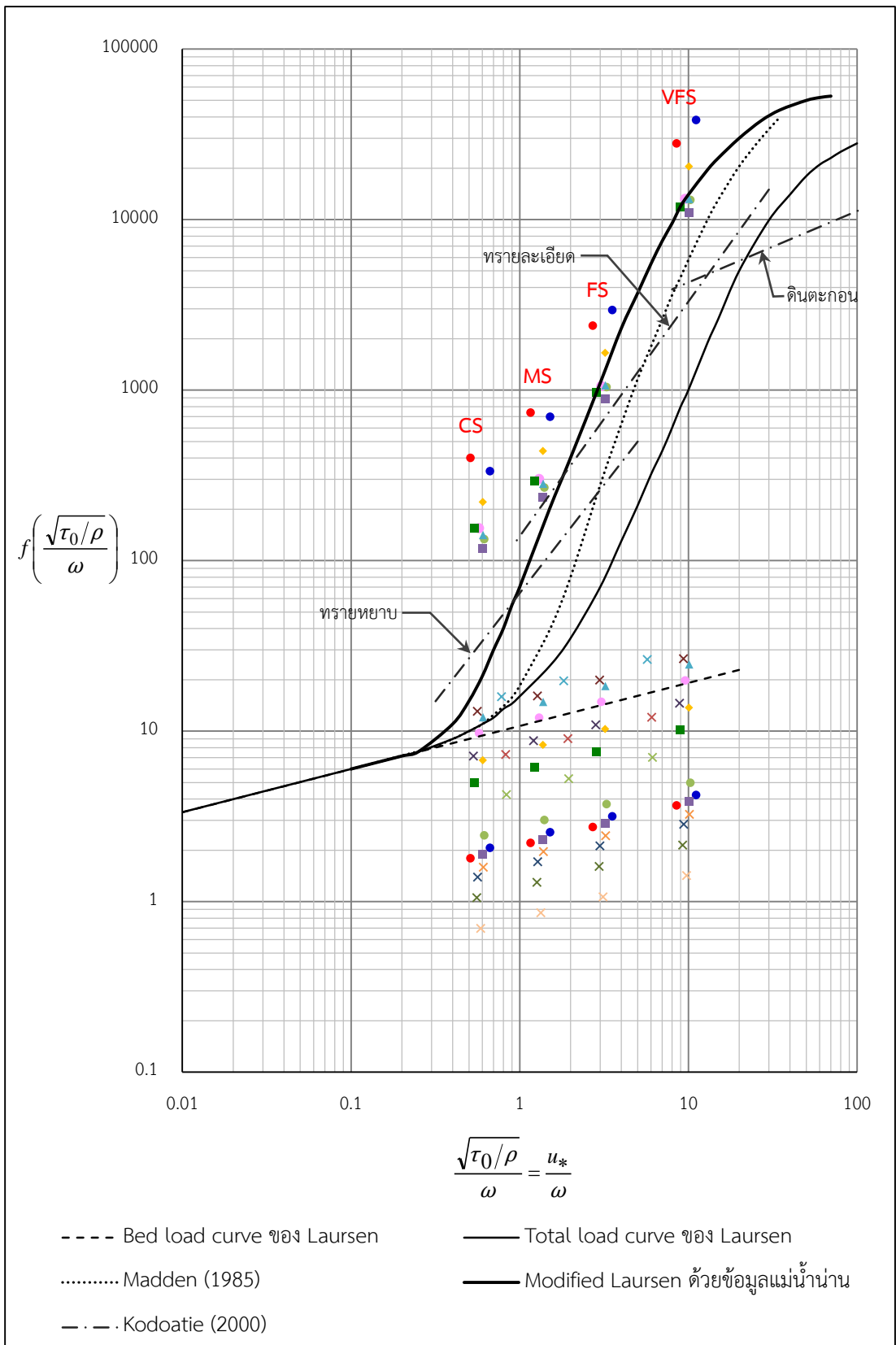


รูปที่ 5-1 เปรียบเทียบผลการสำรวจจริง กับ ผลการคำนวณโดยวิธีการของ Laursen

จากข้อมูลการสำรวจทั้ง 22 ชุดข้อมูล ซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก นำมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำ และค่าฟังก์ชันการคำนวณปริมาณตะกอนรวม ที่ควรจะเป็นของแต่ละชุดข้อมูล เพื่อทำการดัดแปลงสมการของ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537) แสดงผลการคำนวณค่าฟังก์ชันที่ได้ในรูปที่ 5-2

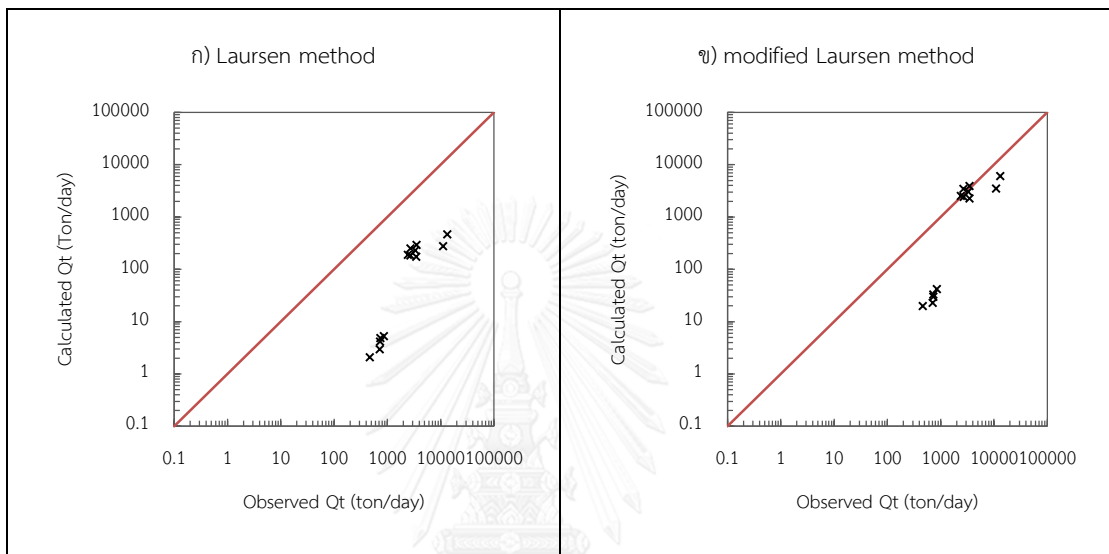
ผลวิเคราะห์ที่ได้พบว่า จุดฟังก์ชันของปริมาณตะกอนรวมจะอยู่เหนือเส้นฟังก์ชันตะกอนรวม (total load curve) ของ Laursen สำหรับการดัดแปลงสมการ Laursen นี้ จะสร้างเส้นฟังก์ชันการคำนวณปริมาณตะกอนรวมของ Laursen ขึ้นใหม่โดยการลากผ่านจุดข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ โดยกำหนดให้เส้นฟังก์ชันของตะกอนรวมจะเริ่มแยกออกจากเส้นฟังก์ชันของตะกอนท้องน้ำ เมื่อมีค่าความเร็วเฉือน ต่อ ความเร็วการตกของเม็ดวัสดุมากกว่า 0.25

สำหรับจุดฟังก์ชันของปริมาณตะกอนท้องน้ำ ส่วนใหญ่จะอยู่ต่ำกว่าเส้นฟังก์ชันตะกอนท้องน้ำ (bed load curve) ของ Laursen อาจเป็นเพราะการเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำในแม่น้ำจริงทำได้ยากกว่าการเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการ จึงได้ค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้โดย Laursen ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงใช้เส้นฟังก์ชันการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำเดิมของ Laursen หรือโดยสมการที่ (1.6)



รูปที่ 5-2 ผลการคำนวณค่าฟังก์ชันของ Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูริย์ (2537)

เปรียบเทียบผลการสำรวจตะกอนรวมของไฟฟูร์ย (2537) (Observed Q_t) กับ ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (Calculated Q_t) ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีลอว์เร็น (Laursen method) และ วิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เร็น (modified Laursen curve) แสดงในรูปที่ 5-3 พร้อมทั้งแสดงค่าการสำรวจตะกอนแขวนลอย และค่าการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมจากทั้ง 2 วิธีในตารางที่ 5-1



รูปที่ 5-3 เปรียบเทียบผลการสำรวจตะกอนรวมของไฟฟูร์ย (2537) กับ ผลการประเมินค่า Q_t ที่ได้

ตารางที่ 5-1 ค่าการสำรวจปริมาณตะกอนรวมของไฟฟูร์ย (2537) และค่า Q_t ที่ประเมินได้

ลำดับ	ผลการสำรวจ (observed sediment load)			ผลการคำนวณ โดยวิธีลอว์เร็น (calculated sediment load)			ผลการคำนวณ โดยวิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เร็น (calculated sediment load)		
	Q_t	Q_b	Q_s	Q_t	Q_b	Q_s	Q_t	Q_b	Q_s
	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน
1	-	3	-	-	4	-	-	4	-
2	-	4	-	-	10	-	-	10	-
3	-	8	-	-	5	-	-	5	-
4	-	15	-	-	89	-	-	89	-
5	-	12	-	-	80	-	-	80	-
6	-	90	-	-	64	-	-	64	-
7	-	6	-	-	53	-	-	53	-
8	-	5	-	-	67	-	-	67	-

ลำดับ	ผลการสำรวจ (observed sediment load)			ผลการคำนวณ โดยวิธีลอว์เรน (calculated sediment load)			ผลการคำนวณ โดยวิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เรน (calculated sediment load)		
	Qt	Qb	Qs	Qt	Qb	Qs	Qt	Qb	Qs
	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน	ตัน/วัน
9	-	63	-	-	81	-	-	81	-
10	13245	21	13224	462	98	364	6013	98	5914
11	11011	16	10995	278	81	198	3495	81	3414
12	465	0	465	2	1	1	20	1	19
13	856	0	856	5	3	3	42	3	39
14	735	0	735	5	3	2	33	3	30
15	715	0	715	3	2	1	23	2	21
16	732	0	732	4	2	2	30	2	28
17	3508	17	3491	294	66	228	3911	66	3845
18	3320	64	3256	230	61	169	3031	61	2970
19	2688	13	2675	252	65	186	3439	65	3374
20	3477	35	3442	174	49	125	2271	49	2222
21	2416	53	2363	189	42	147	2512	42	2471
22	2716	25	2691	183	46	136	2412	46	2366

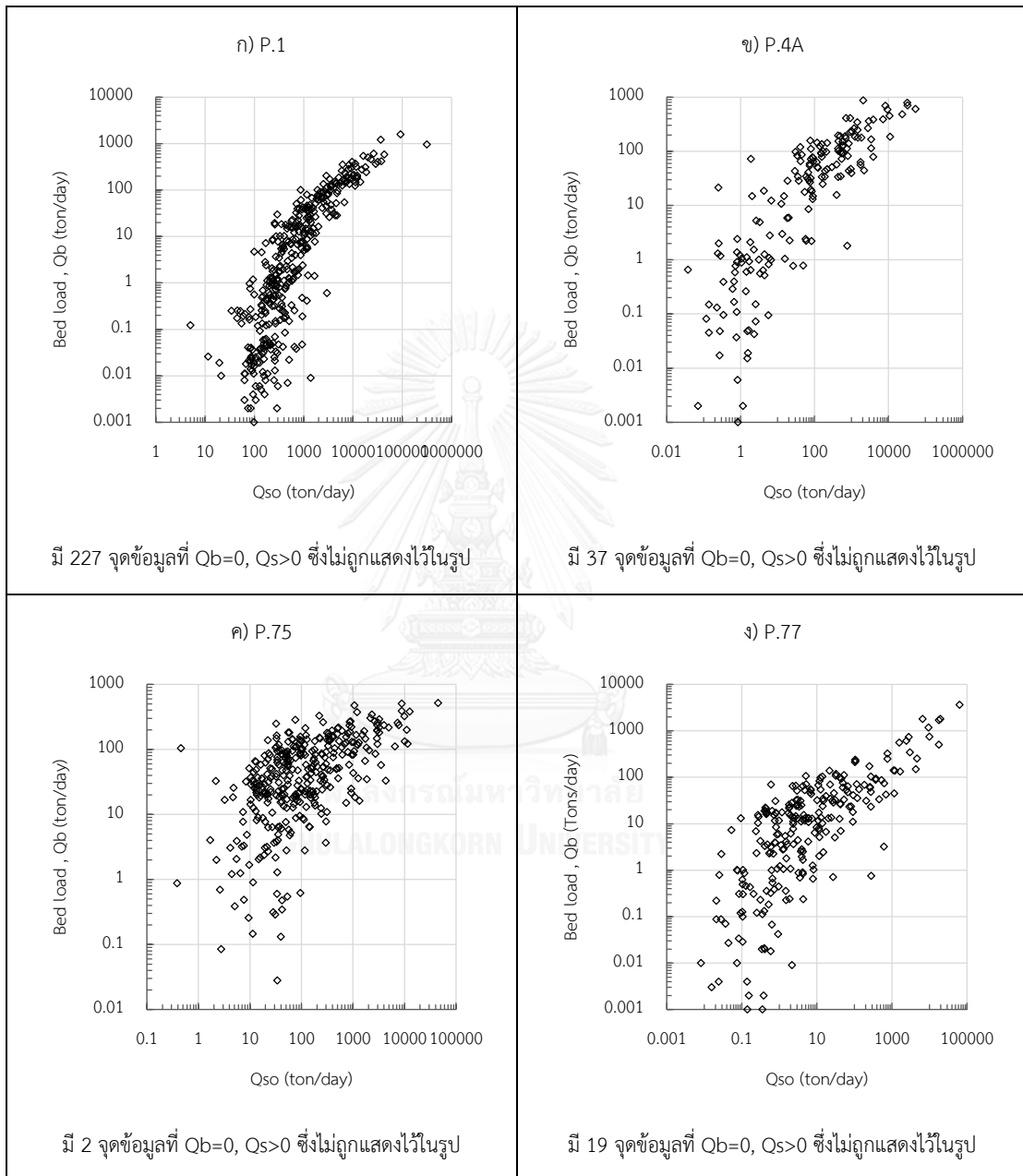
หมายเหตุ “-” หมายถึง ไม่ได้ทำการสำรวจ

ผลการคำนวณโดยวิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เรน (modified Laursen curve) พบว่ามีค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) ลดลงเหลือ 32.0% จากเดิมที่มีค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) 92.7%

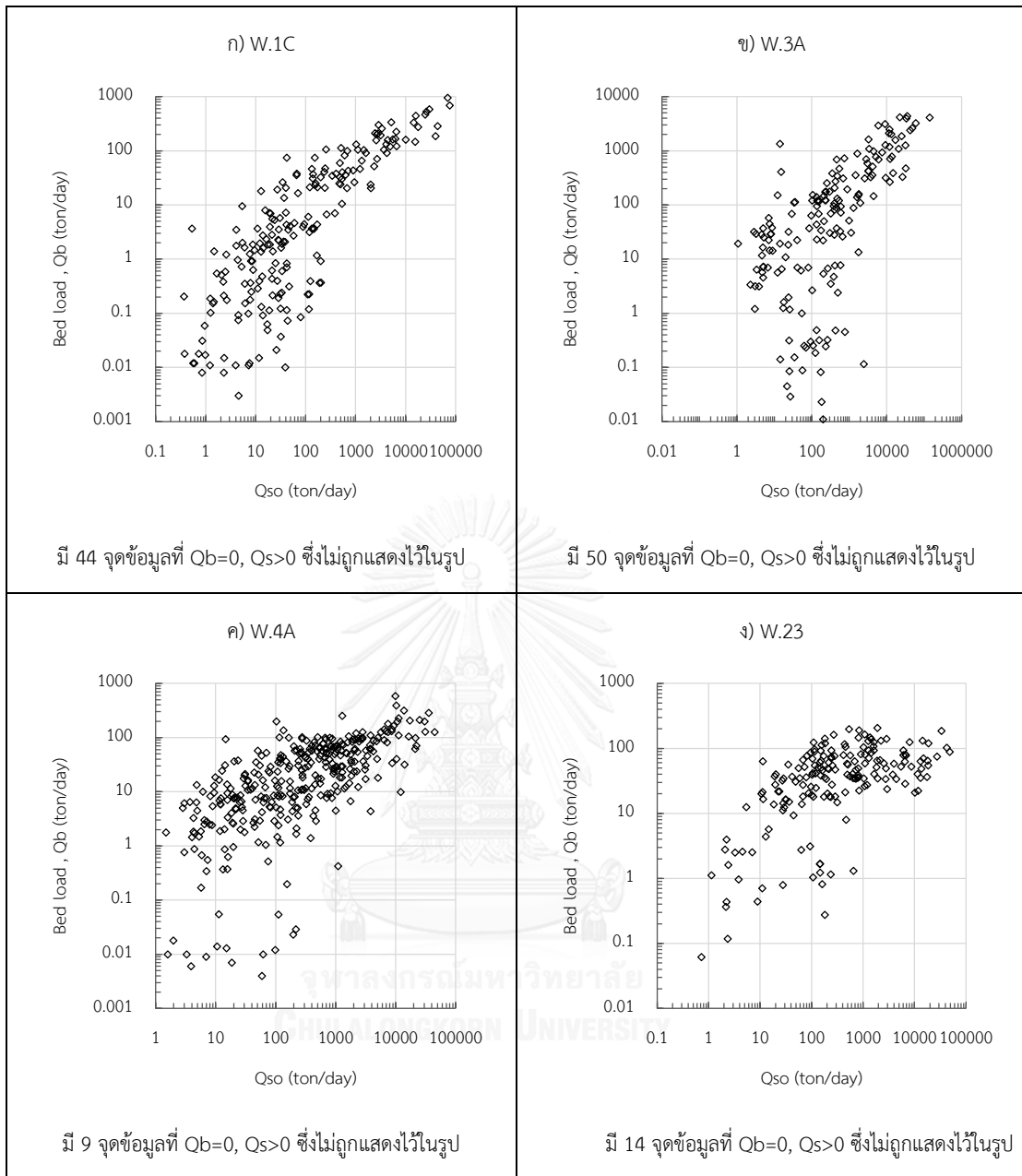
5.2. ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนท้องน้ำ

อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (Qb) สามารถประเมินได้ด้วยวิธีการคำนวณของ Laursen ดังแสดงในหัวข้อ 3.2.2. ทั้งนี้ เนื่องจากข้อมูลการสำรวจตะกอนท้องน้ำของประเทศไทยมีอยู่ค่อนข้างจำกัด ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำได้เพียงประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำของแต่ละแม่น้ำ แสดงค่าประเมิน Qb ที่ได้ กับ ค่าการสำรวจปริมาณตะกอนแขวนลอยของกรมชลประทาน (Qso) ดังรูปที่ 5-4 ถึง 5-7 สังเกตได้ว่า ที่ค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยหนึ่ง ๆ จะพบผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำหลายค่า และเป็นช่วงกว้างที่ให้ค่า

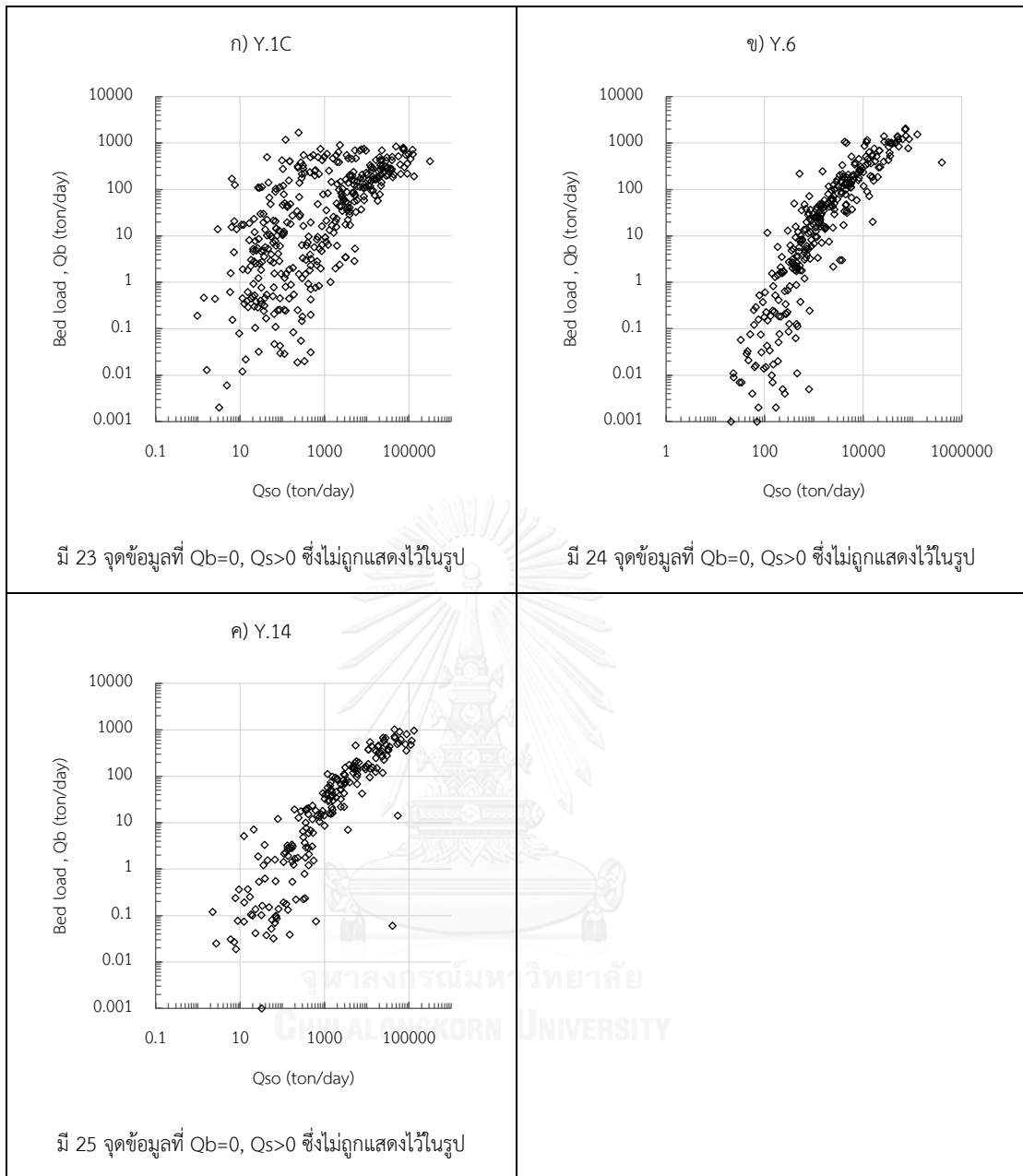
ต่างกันหลายสิบเท่า แสดงว่าปริมาณตะกอนที่องน้ำไม่ได้เป็นส่วนคงที่เมื่อเทียบกับปริมาณตะกอนแขวนลอย



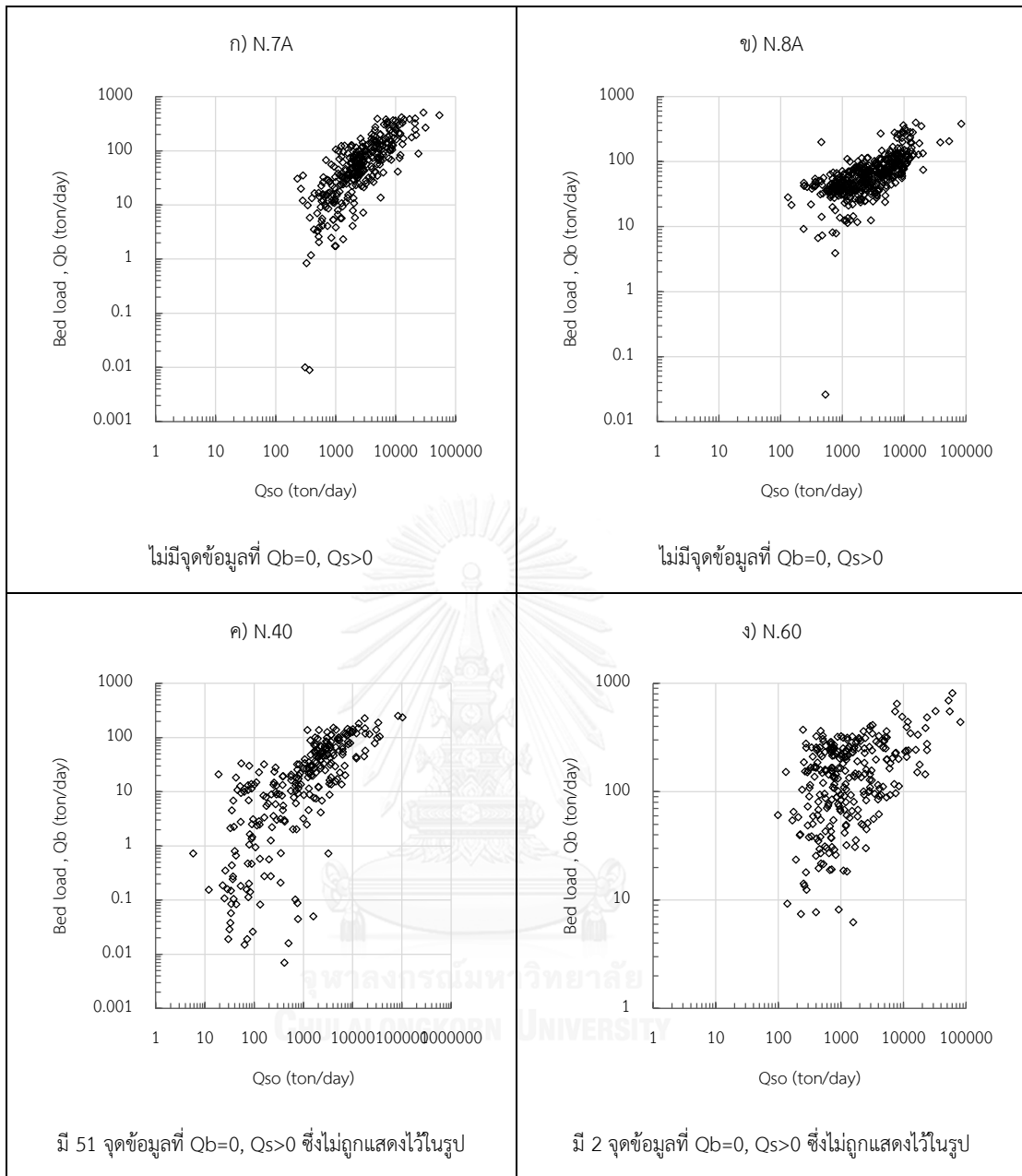
รูปที่ 5-4 ค่า Q_{so} กับ ผลการประเมินค่า Q_b ของสถานีในกลุ่มน้ำปิง



รูปที่ 5-5 ค่า Q_{so} กับ ผลการประเมินค่า Q_b ของสถานีในกลุ่มน้ำวัง



รูปที่ 5-6 ค่า Q_{so} กับ ผลการประเมินค่า Q_b ของสถานีในกลุ่มน้ำยม



รูปที่ 5-7 ค่า Q_{so} กับ ผลการประเมินค่า Q_b ของสถานีในกลุ่มน้ำ่าน

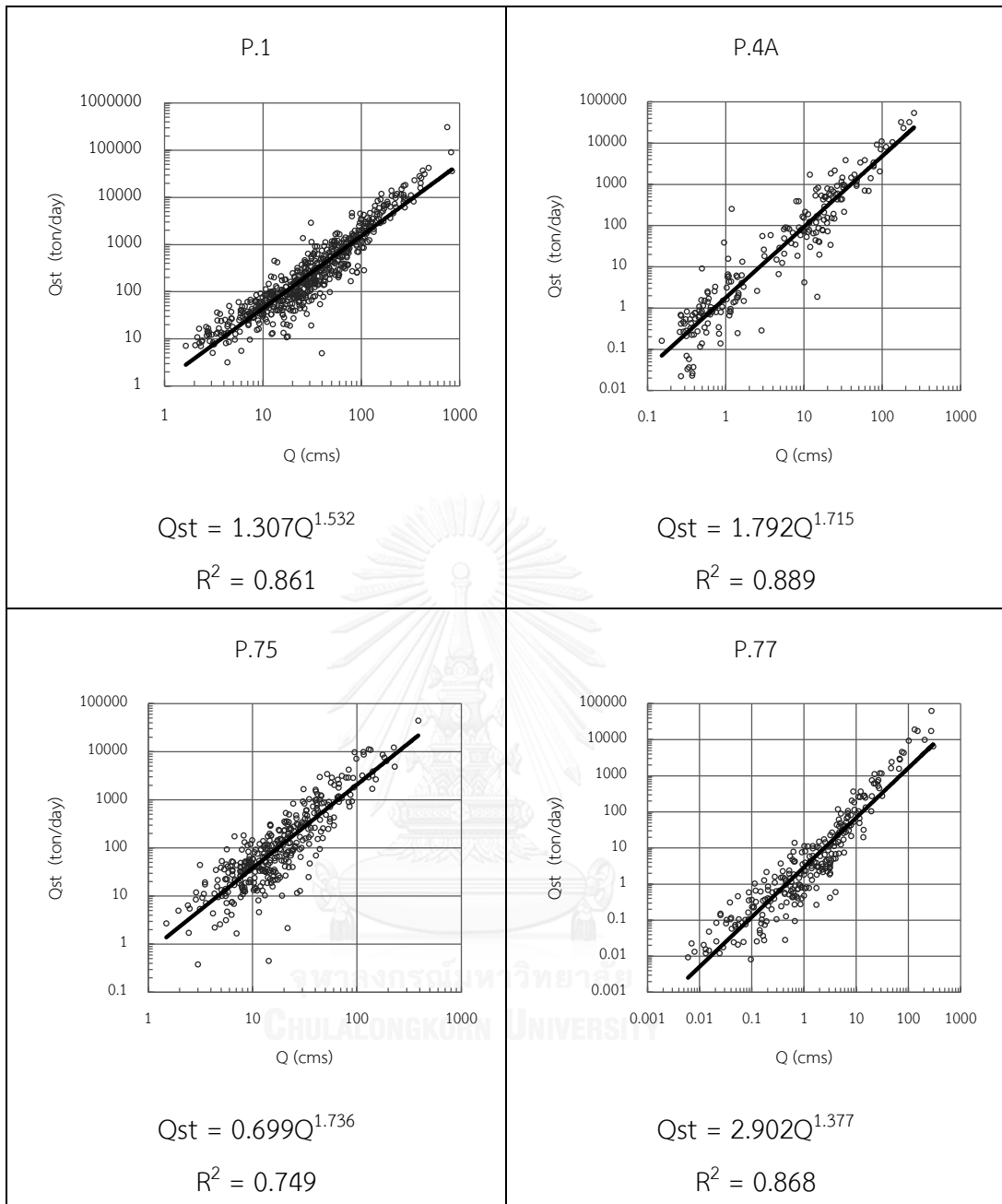
จากการคำนวณพบว่า บางชุดข้อมูลไม่เกิดการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำเลย จึงมีค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเท่ากับศูนย์ ($Q_b=0$) ซึ่งไม่ถูกแสดงไว้ในกราฟข้างต้น แต่จากผลสำรวจตะกอนแขวนลอยของชุดข้อมูลนั้นได้ค่าที่มากกว่าศูนย์ ($Q_s>0$) แสดงว่ามีการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยเกิดขึ้น ซึ่งแต่ละสถานีจะมีช่วงค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำที่ต่างกันไป

5.3. ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนรวม

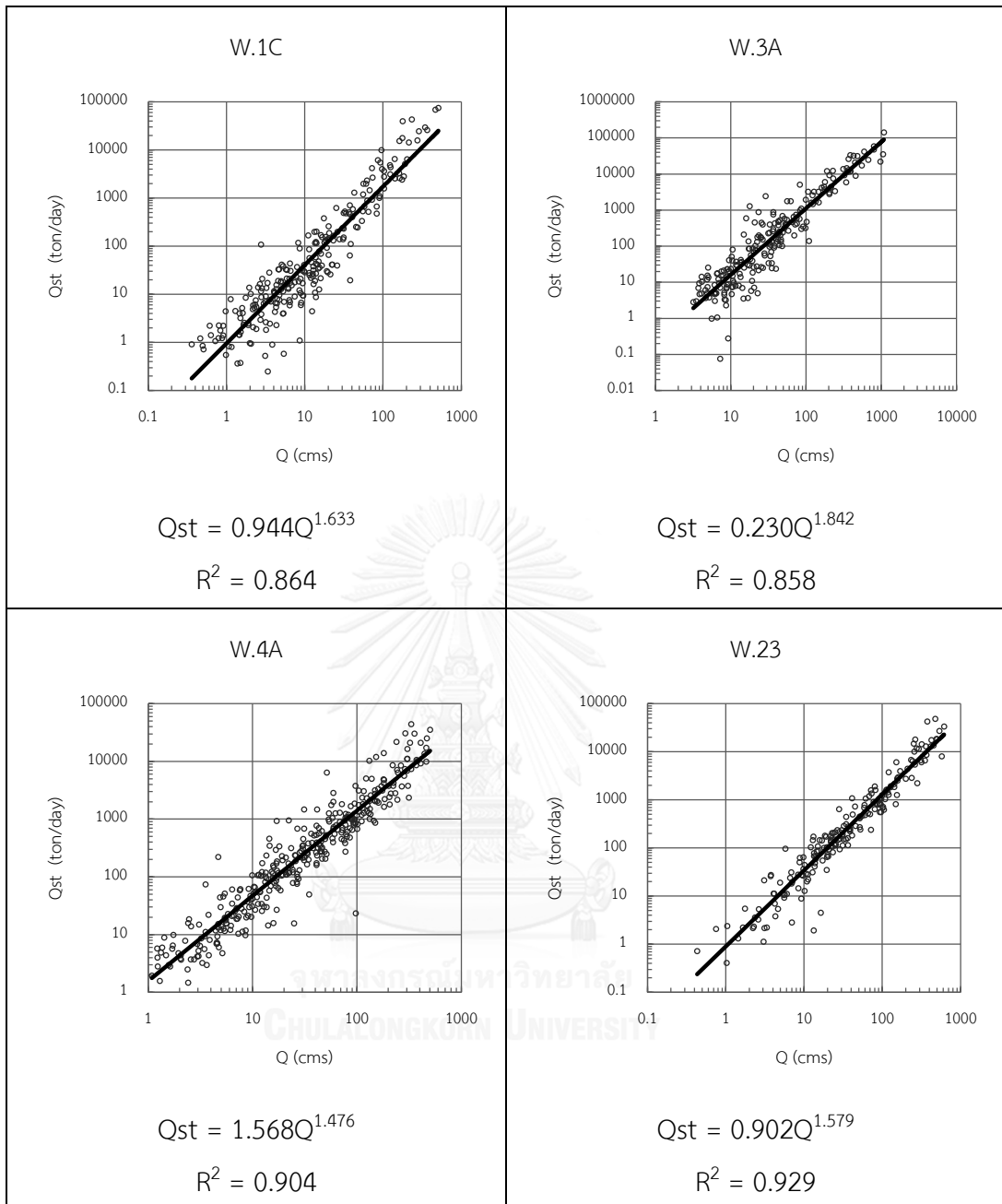
วิเคราะห์อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมเพื่อให้ได้มาซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย สำหรับเปรียบเทียบความสามารถในการประเมินของวิธีต่าง ๆ ได้แก่ วิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (Sediment-Discharge Rating Curve) วิธีลอเรนเซน (Laursen method) วิธีดัดแปลงโค้งของลอเรนเซน (modified Laursen curve) ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่าน และ วิธีลอเรนเซนดัดแปลงโดยแมดเดน (Madden's modification of Laursen method) ซึ่งใช้ค่าการสำรวจตะกอนของกรมชลประทาน (Q_{s0}) เป็นตัวเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

5.3.1. วิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (Sediment-Discharge Rating Curve)

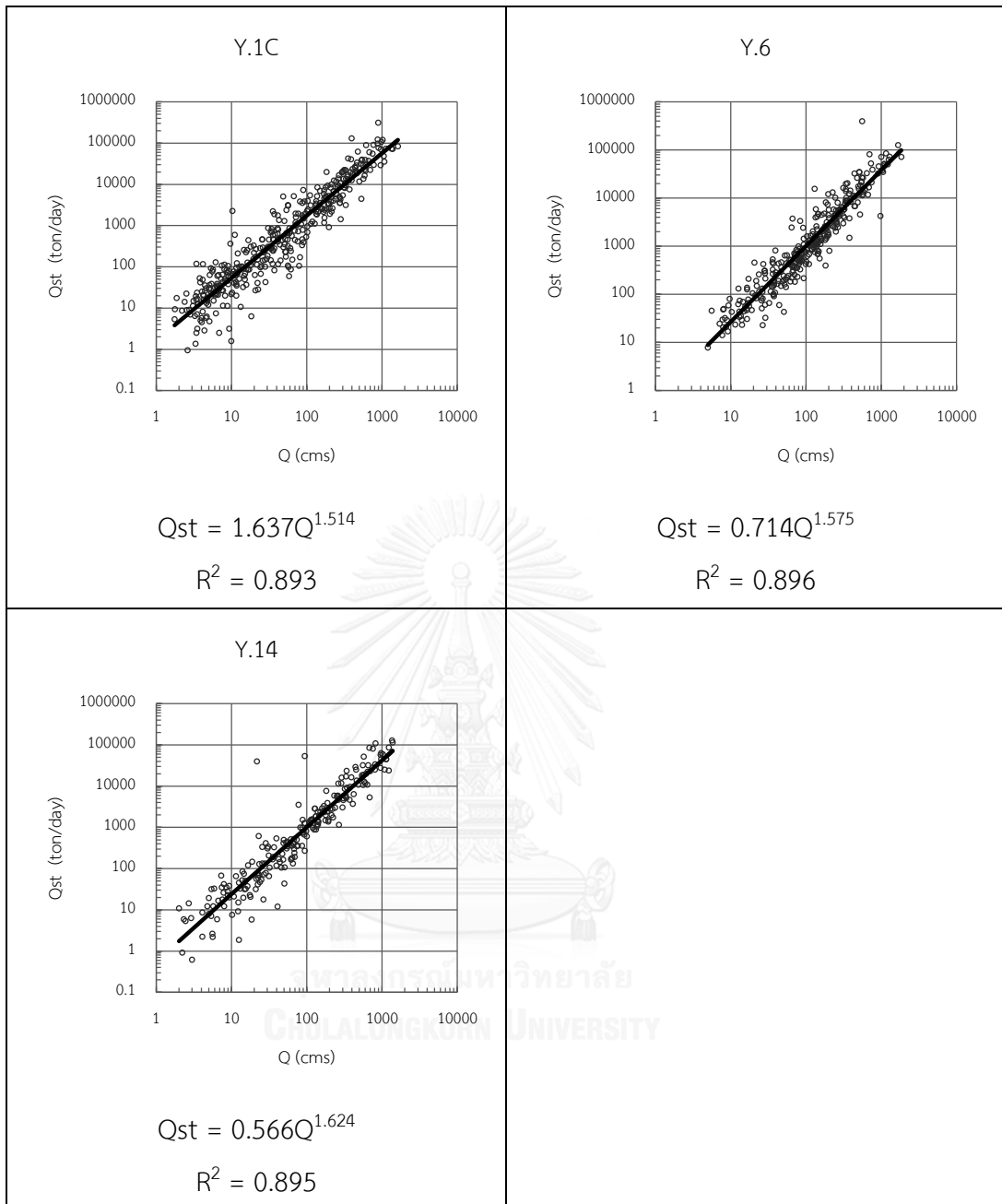
การประมาณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย (Q_{st}) ด้วยวิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล บนพื้นฐานข้อมูลที่มีอยู่จำกัดของการใช้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอัตราการไหลของน้ำ (Q) เพียงตัวแปรเดียวนั้น จะสามารถให้ค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยได้เสมอขอเพียงมีค่าอัตราไหลของน้ำ แม้ว่าช่วงอัตราการไหลของน้ำที่น้อยมาก ๆ สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวยังคงให้ค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย พิจารณาโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (sediment-discharge rating curve) ของแต่ละสถานีในกลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่าน แสดงผลได้ดังรูปที่ 5-8 ถึง รูปที่ 5-11 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่า อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวมของกรมชลประทาน (Q_{s0}) มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ดีกับอัตราการไหลของน้ำ (Q) โดยสมการที่ได้จากแต่ละสถานีในกลุ่มน้ำปิง วัง และยมมีค่า R-Squared (R^2) มากกว่า 0.8 ทั้งสิ้น ส่วนสมการของแต่ละสถานีในกลุ่มน้ำน่านต่างมีค่า R^2 ประมาณ 0.7 ยกเว้นที่สถานี N.60 ซึ่งมีค่า R^2 ค่อนข้างต่ำเพียง 0.3



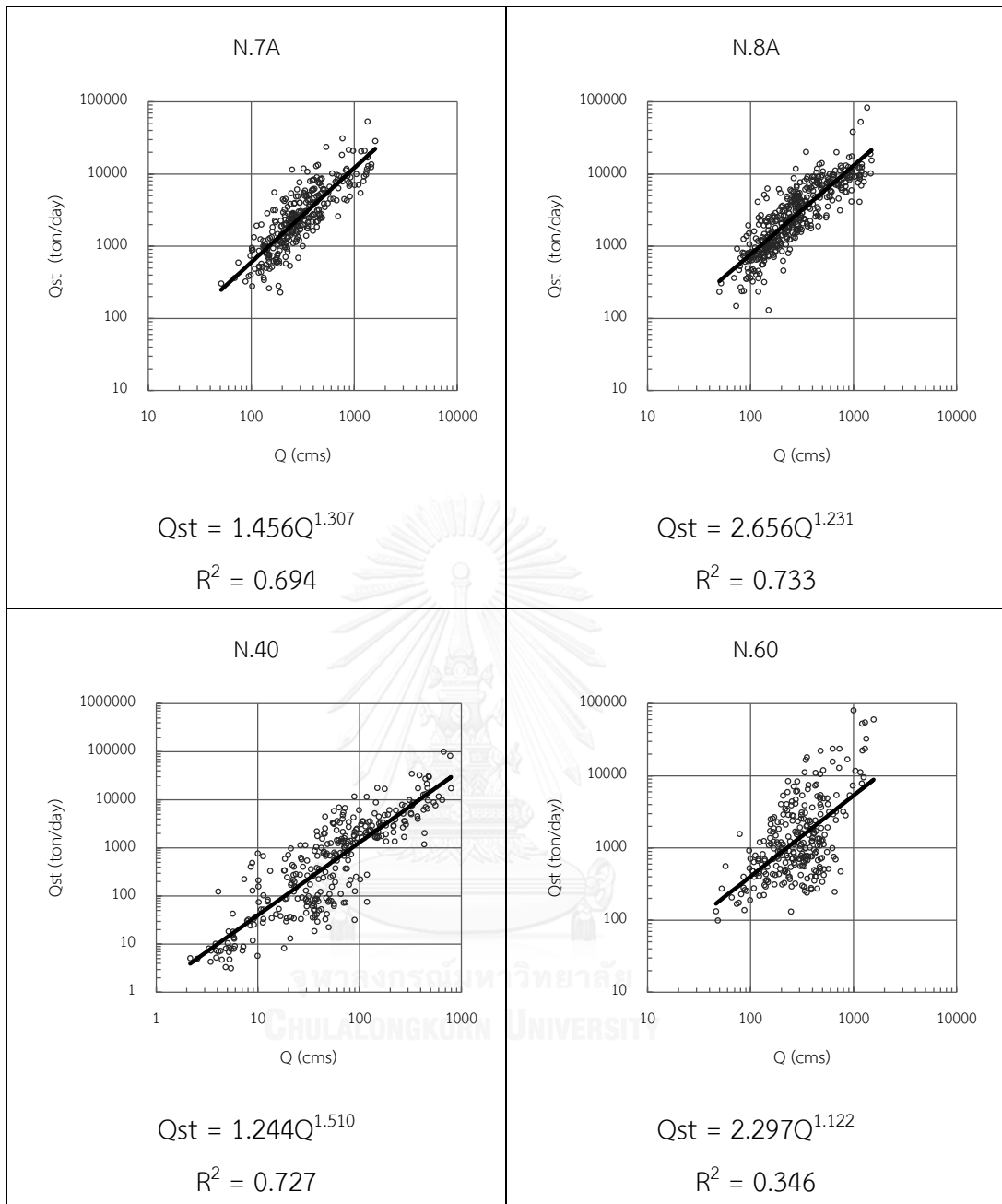
รูปที่ 5-8 sediment-discharge rating curve ของสถานีในกลุ่มน้ำปิง



รูปที่ 5-9 sediment-discharge rating curve ของสถานีในกลุ่มน้ำวัง

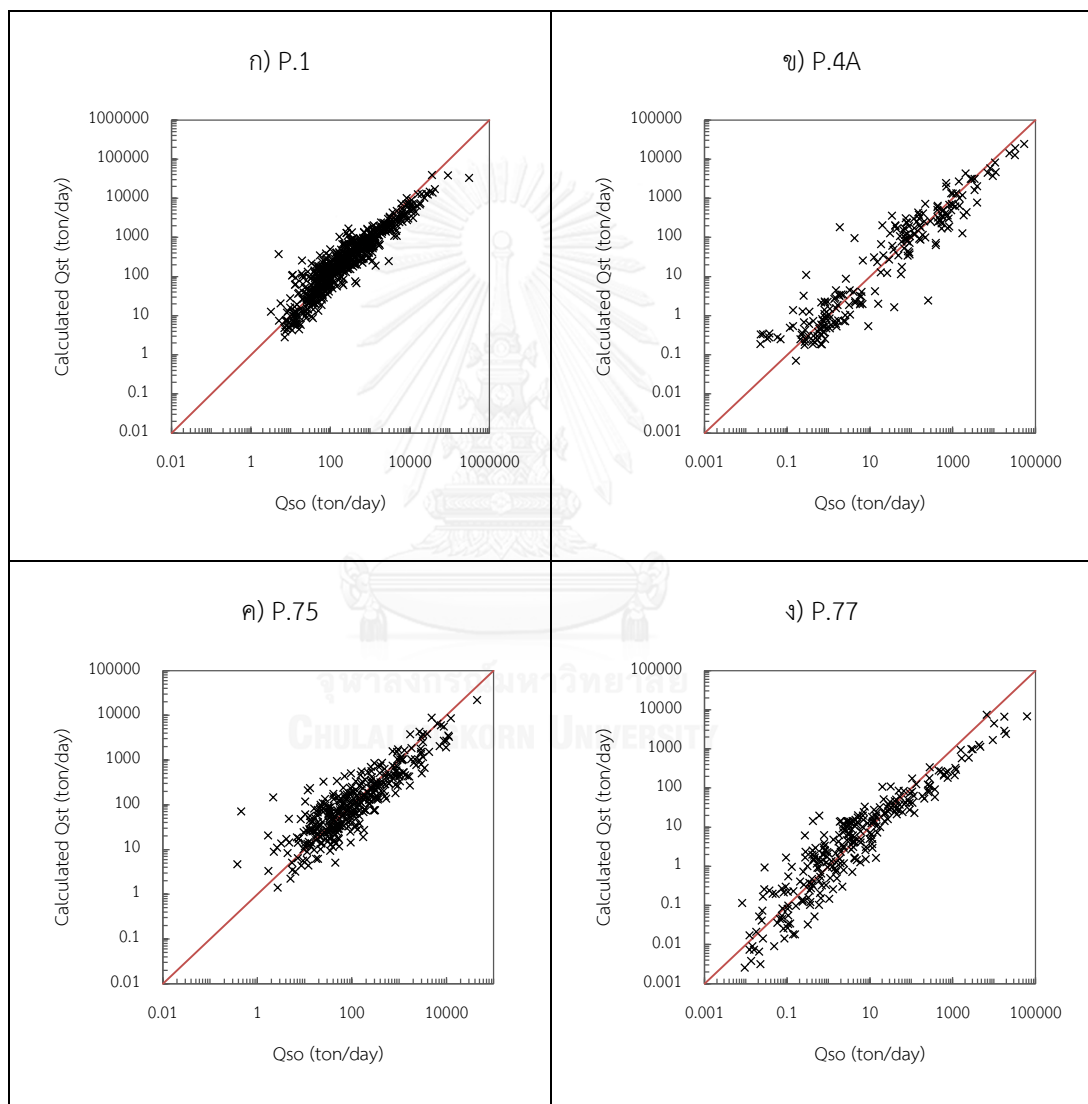


รูปที่ 5-10 sediment-discharge rating curve ของสถานีในกลุ่มน้ำยม

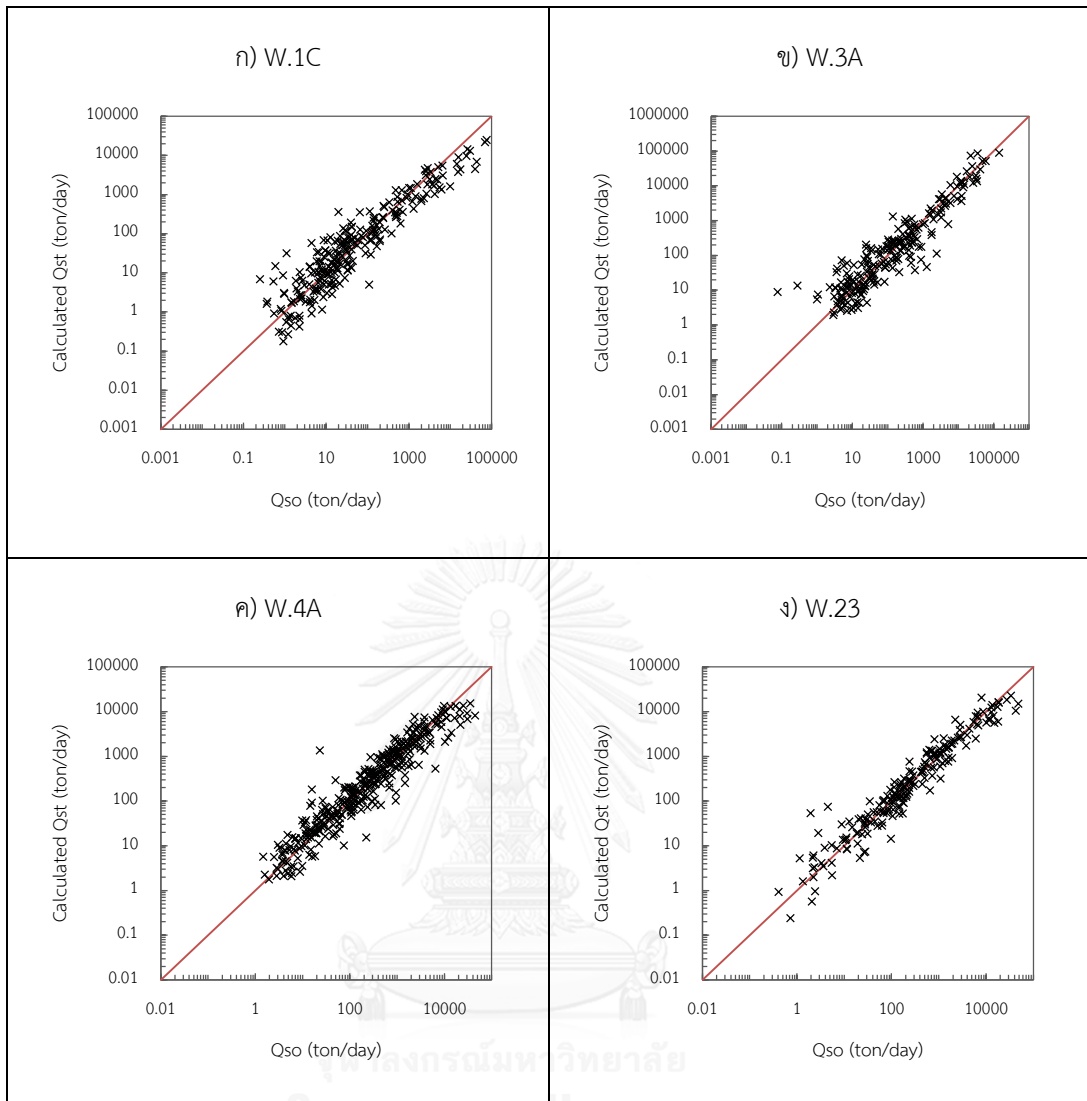


รูปที่ 5-11 sediment-discharge rating curve ของสถานีในกลุ่มน้ำ่าน

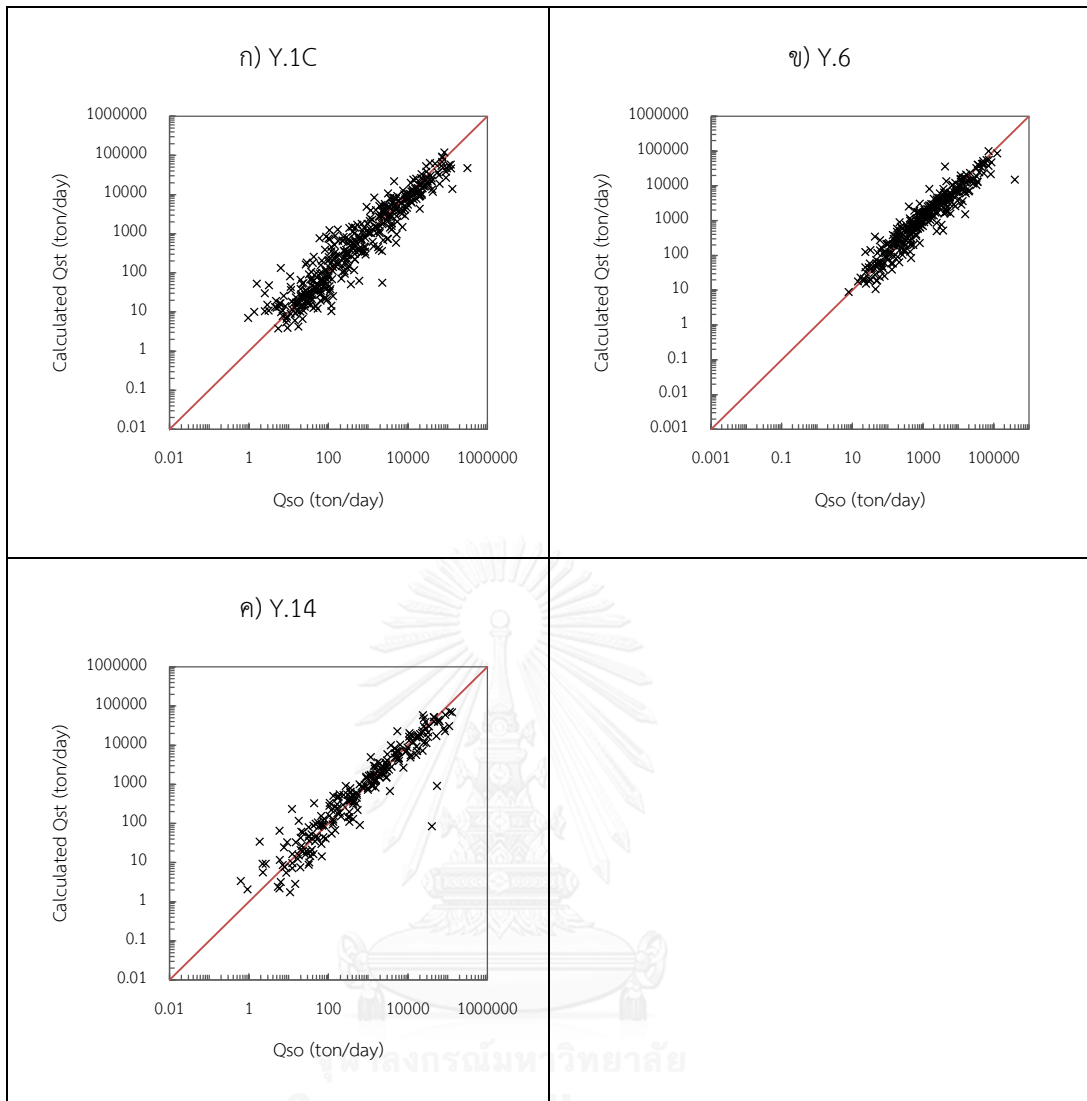
เปรียบเทียบค่าการสำรวจปริมาณตะกอนแขวนลอยของกรมชลประทาน (Q_{so}) กับ ผลการประเมินปริมาณตะกอนแขวนลอยด้วยวิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (sediment-discharge rating curve) (Q_{st}) ของสถานีในลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่าน ดังแสดงในรูปที่ 5-12 ถึง รูปที่ 5-15 ตามลำดับ พร้อมทั้งแสดงค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) ที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ 5-2



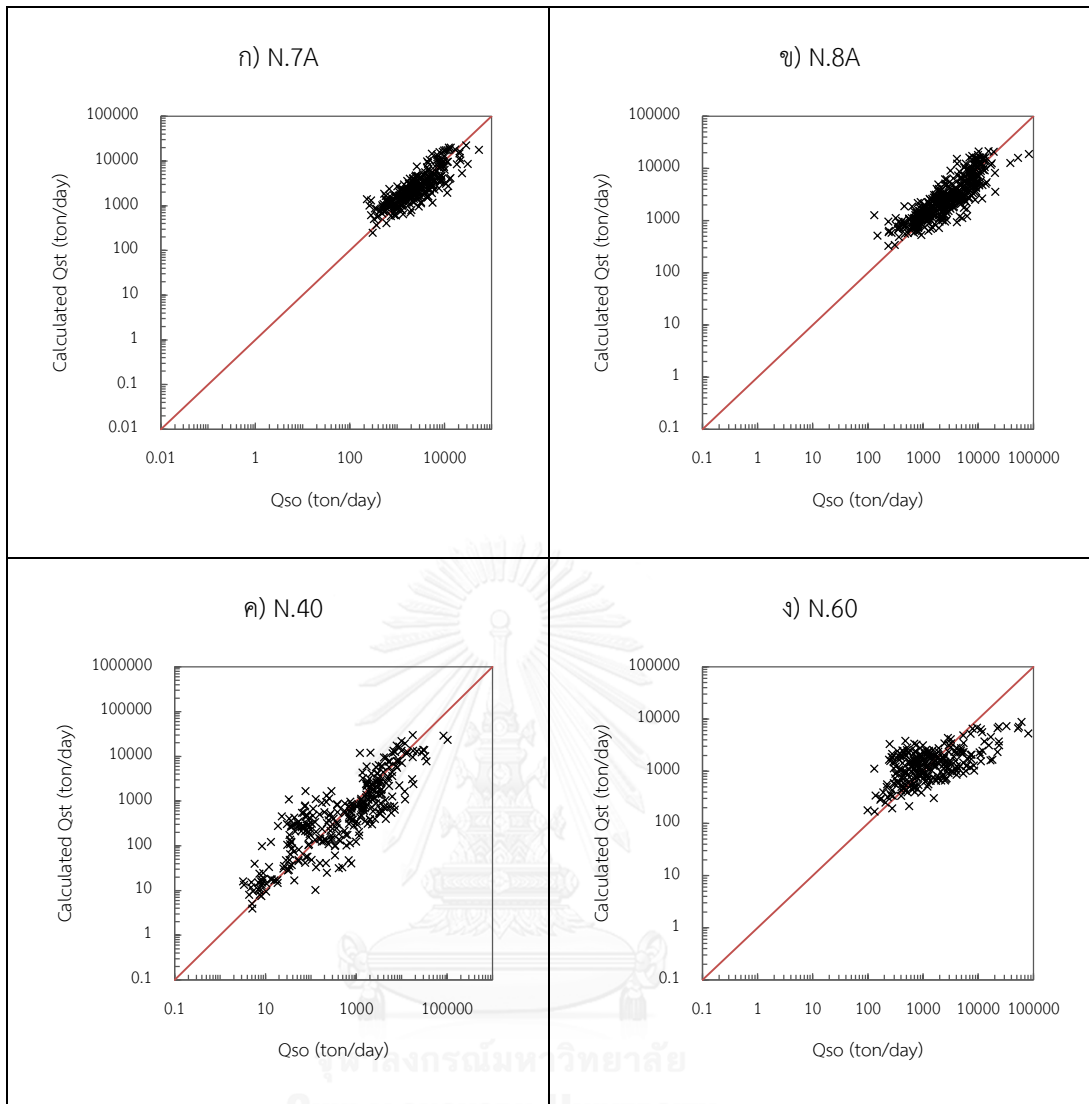
รูปที่ 5-12 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำปิง



รูปที่ 5-13 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำวัง



รูปที่ 5-14 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก sediment-discharge rating curve ของสถานีในลุ่มน้ำยม



รูปที่ 5-15 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก *sediment-discharge rating curve* ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน

ตารางที่ 5-2 ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี ที่คำนวณโดยวิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอน
แขวนลอยกับอัตราการไหล (sediment-discharge rating curve)

สถานี	%SSE	R ²	\bar{R}_D
P.1	71.4	0.509	1.41
P.4A	27.8	0.945	2.37
P.75	30.2	0.838	2.12
P.77	74.8	0.585	2.10
W.1C	49.1	0.851	1.86
W.3A	26.1	0.724	2.26
W.4A	41.0	0.629	1.39
W.23	32.0	0.698	1.36
Y.1C	46.3	0.521	1.60
Y.6	66.0	0.304	1.24
Y.14	29.9	0.697	1.46
N.7A	30.6	0.518	1.16
N.8A	37.9	0.428	1.15
N.40	49.7	0.501	2.04
N.60	73.6	0.430	1.58
เฉลี่ย	45.8	0.612	1.67

จากตารางสังเกตได้ว่าค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละสถานีมีค่าอยู่ในช่วง 1.15 - 2.37 โดยสถานีส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 1 และมีค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) ที่แตกต่างกันไปในแต่ละสถานี อยู่ในช่วงตั้งแต่ 27.8 - 74.8% และ R² อยู่ในช่วง 0.304 - 0.945

5.3.2. วิธีลอเรนเซน (Laursen method)

เนื่องจากวิธีลอเรนเซน (Laursen method) ถูกพัฒนามาจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นปริมาณตะกอนรวมที่วิเคราะห์ได้จึงมาจากวัสดุที่ongน้ำทั้งหมด (Qbt) ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ประเมินได้ด้วยวิธีนี้ จึงนับเป็นตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุที่ongน้ำ (Qsb)

เปรียบเทียบผลการสำรวจตะกอนแขวนลอยของกรมชลประทาน (Qso) กับ ผลการคำนวณ โดยวิธี Laursen ของสถานีในกลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่าน ดังแสดงในรูปที่ 5-16 ถึง รูปที่ 5-19 ตามลำดับ พร้อมทั้งแสดงค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) ที่ได้จากการคำนวณดัง ตารางที่ 5-3

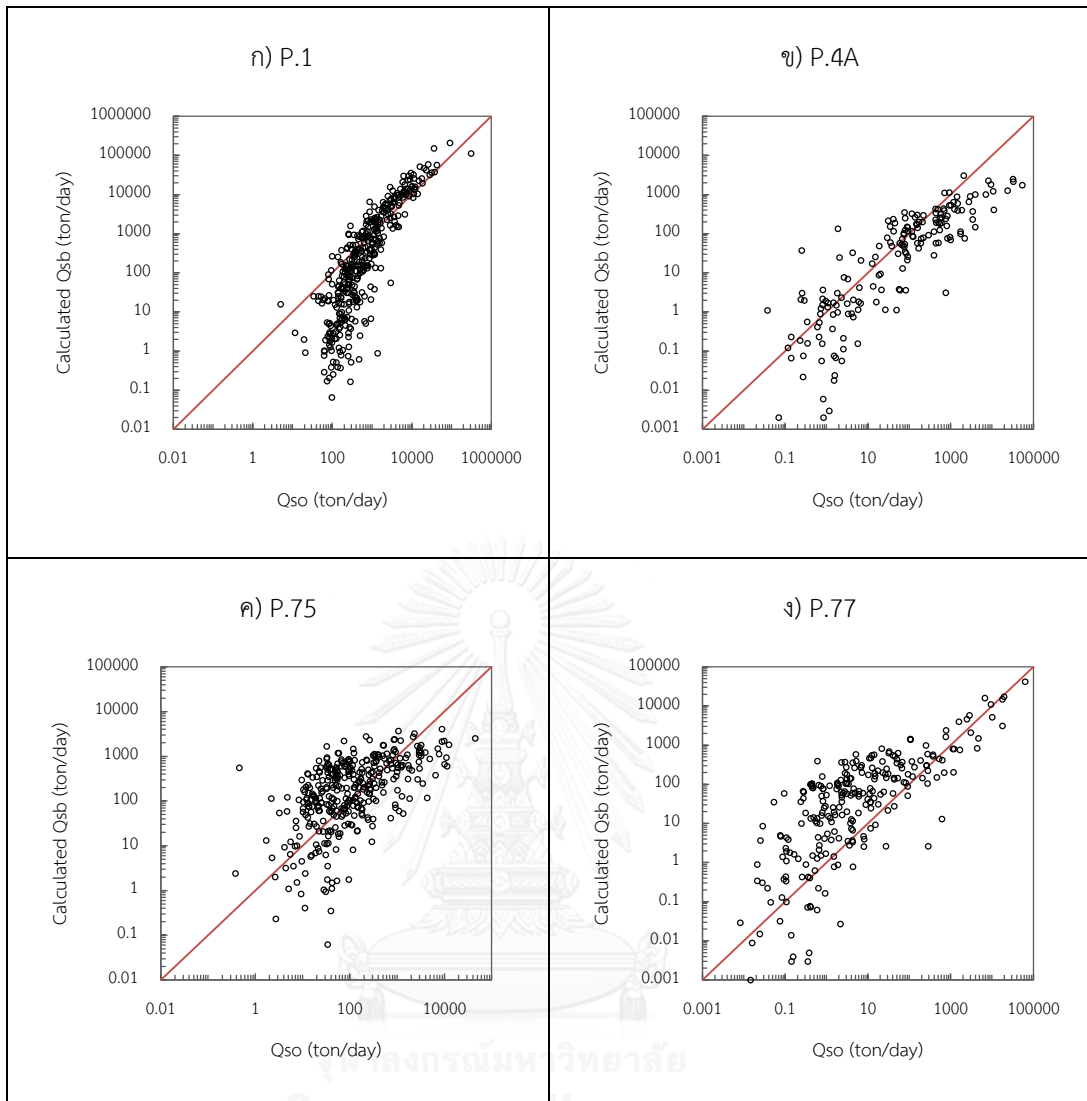
การคำนวณโดยวิธี Laursen จะให้ผลการคำนวณที่บางจุดข้อมูลไม่เกิดการเคลื่อนที่ของวัสดุ ท้องน้ำ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.2. ส่งผลให้การคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมจึงมีค่า เป็นศูนย์ และได้ค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำเป็นศูนย์เช่นกัน สำหรับจุดข้อมูลที่คำนวณได้ค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยเป็นศูนย์ จะไม่ถูกแสดงในรูป ที่ 5-16 ถึง รูปที่ 5-19

จากรูปที่ 5-16 ก) เปรียบเทียบผลการคำนวณของสถานี P.1 จะเห็นว่าชุดข้อมูลการสำรวจ ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ได้ค่าน้อย ๆ (<150 ตัน/วัน) วิธี Laursen method จะประเมินอัตราการ เคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยได้น้อยกว่าผลสำรวจหลายเท่า เช่นเดียวกับที่สถานี P.4A ชุดข้อมูล ส่วนใหญ่ประเมินได้น้อยกว่าผลการสำรวจ ส่วนสถานี P.75 และ P.77 ผลการคำนวณส่วนใหญ่ค่อนข้าง ไปทางประเมินได้สูงเกินจริง

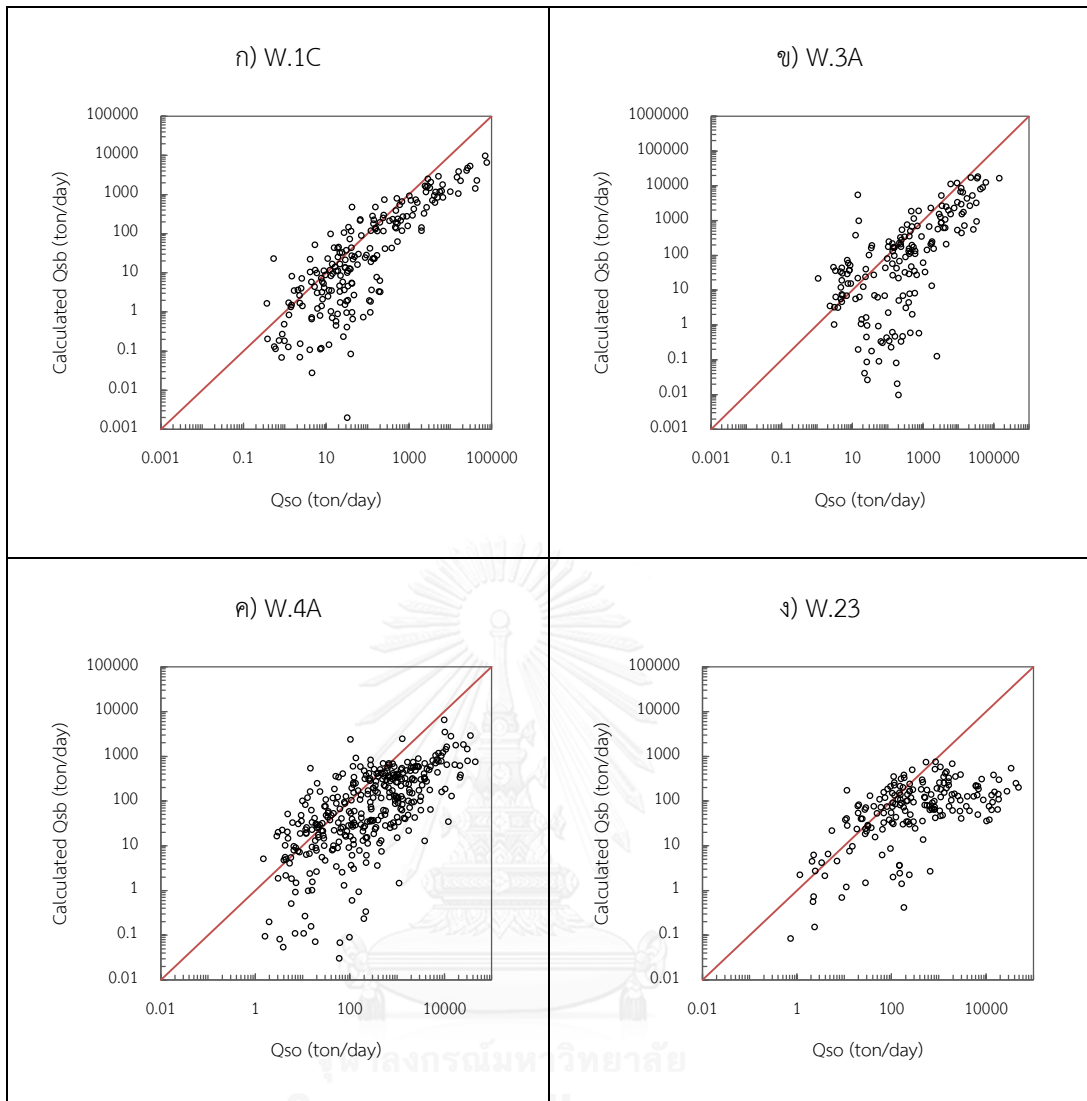
สำหรับสถานีในกลุ่มน้ำวัง รูปที่ 5-17 ผลการประเมินส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นว่าประเมินได้ต่ำกว่าผล การสำรวจ แต่ยังคงอยู่ในแนวเส้น 45 องศา

สำหรับกลุ่มน้ำยม รูปที่ 5-18 ก) สถานี Y.1C มีช่วงการกระจายของความคลาดเคลื่อนที่ ประเมินได้ค่อนข้างกว้าง เมื่อเทียบกับอีก 2 สถานี โดยสถานี Y.6 มีลักษณะของกราฟคล้ายกับที่ สถานี P.1 ในกลุ่มน้ำยม กล่าวคือ หากการสำรวจปริมาณตะกอนแขวนลอยได้ค่าน้อย ๆ (< 1000 ตัน/ วัน) วิธี Laursen จะประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยได้น้อยกว่าผลสำรวจหลายเท่า

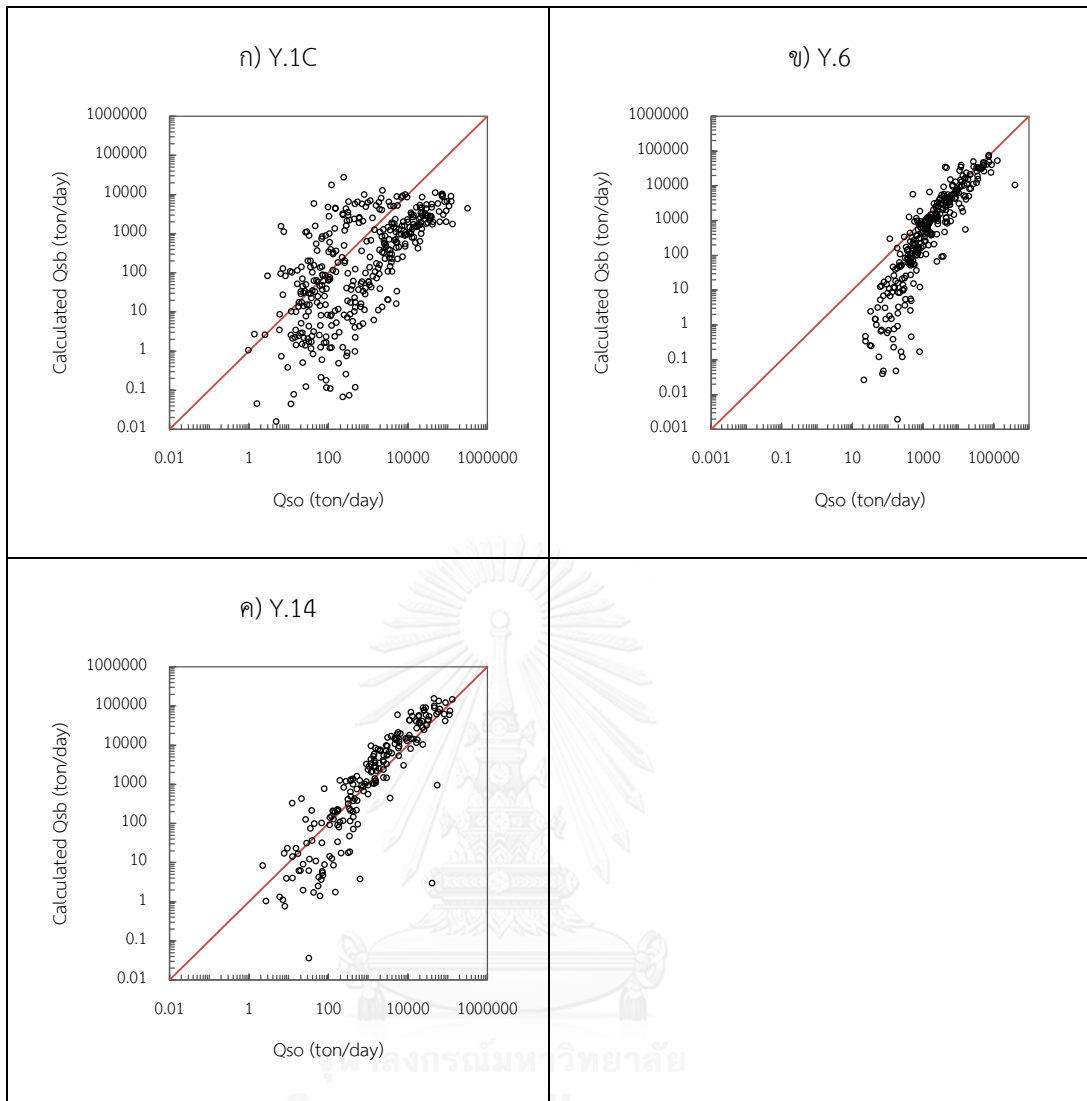
รูปที่ 5-18 แสดงให้เห็นว่า วิธี Laursen method ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอน แขวนลอยได้น้อยกว่าผลการสำรวจอย่างเห็นได้ชัดใน 3 สถานี คือ N.7A, N.8A และ N.60 ส่วนสถานี N.40 ค่อนข้างแตกต่างจากสถานีอื่น โดยประเมินค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยได้สูงเกิน จริงเกือบทุกชุดข้อมูลในสถานี



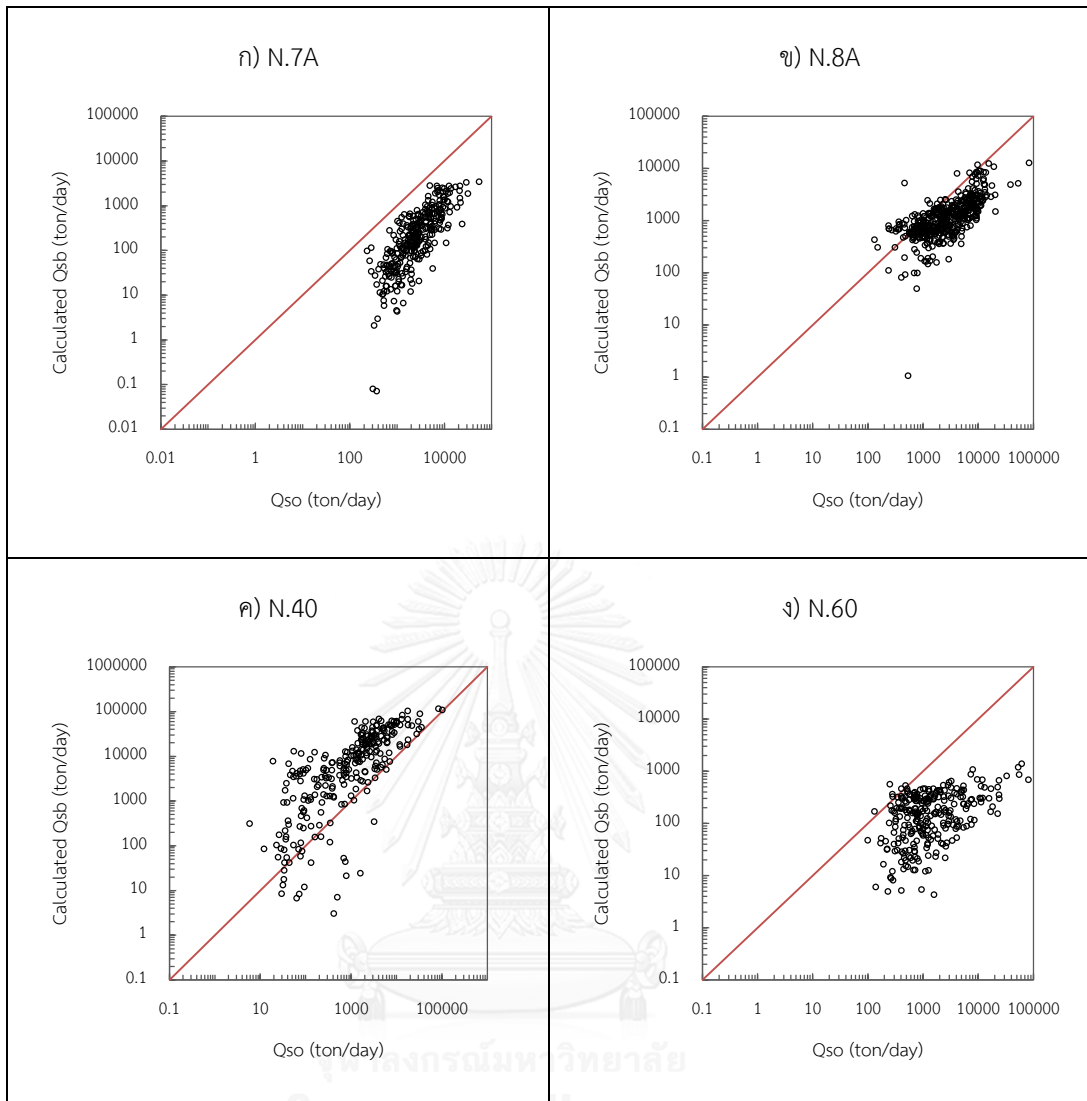
รูปที่ 5-16 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{sb} จาก Laursen method ของสถานีในกลุ่มน้ำปิง



รูปที่ 5-17 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{sb} จาก Laursen method ของสถานีในกลุ่มน้ำวัง



รูปที่ 5-18 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{sb} จาก Laursen method ของสถานีในกลุ่มน้ำยม



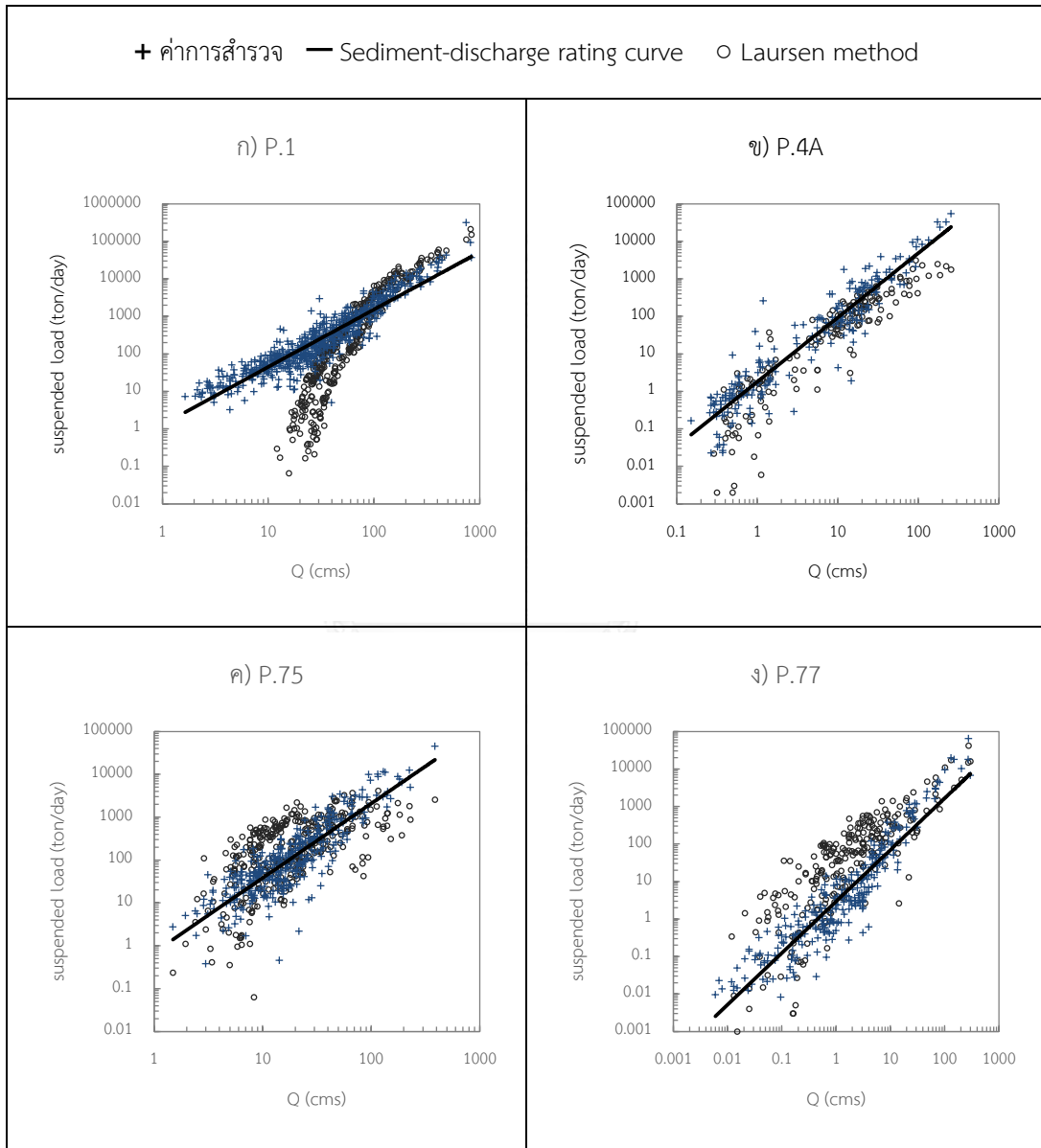
รูปที่ 5-19 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{sb} จาก Laursen method ของสถานีในกลุ่มน้ำ่าน

ตารางที่ 5-3 ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี ที่คำนวณด้วย Laursen method

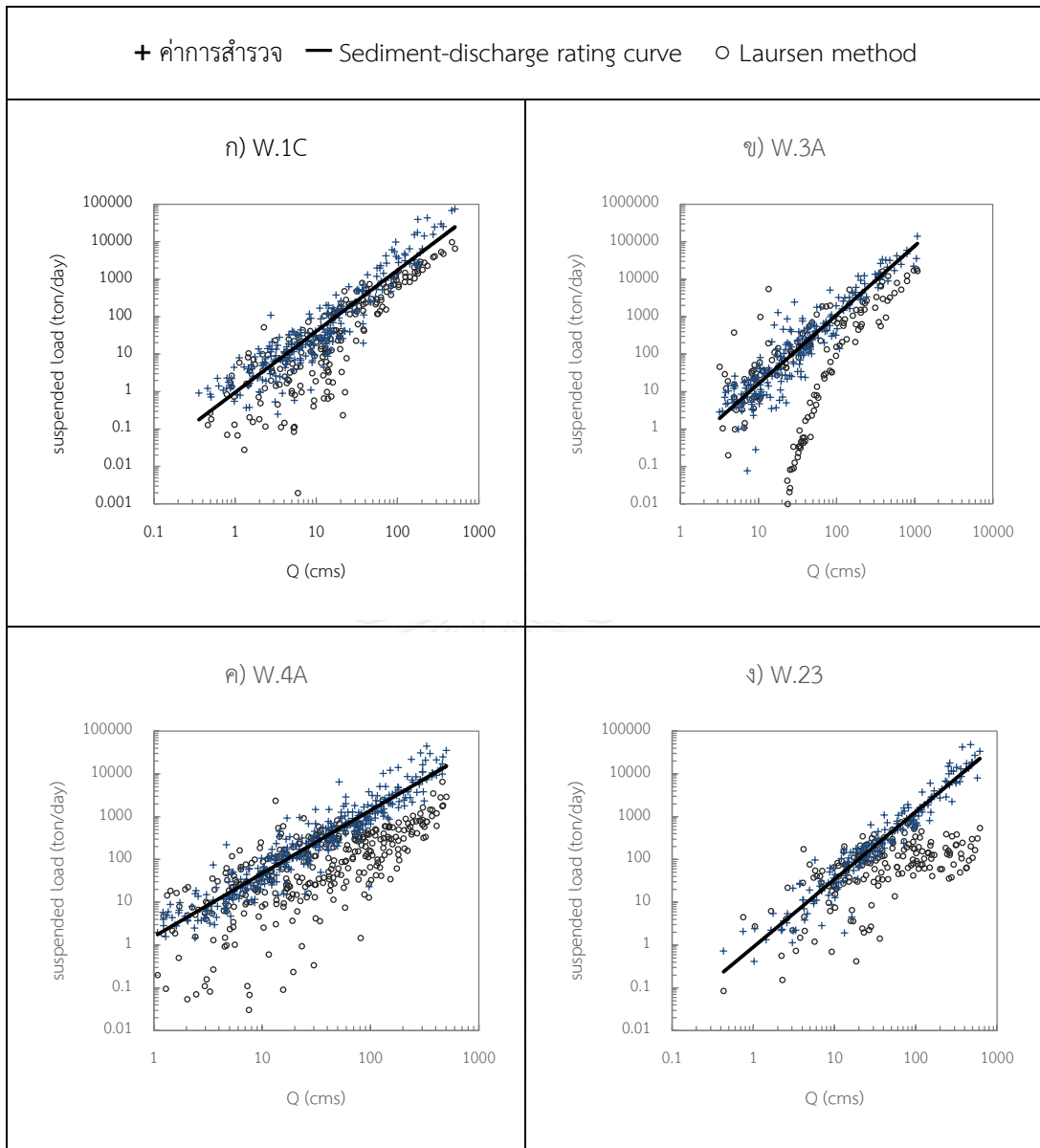
สถานี	%SSE	R^2	$\overline{R_D}$
P.1	64.4	0.432	0.57
P.4A	88.9	0.443	2.08
P.75	82.9	0.167	7.82
P.77	16.7	0.882	32.66
W.1C	78.7	0.762	0.87
W.3A	69.9	0.517	3.15
W.4A	88.5	0.238	1.08
W.23	98.0	0.046	0.70
Y.1C	90.7	0.120	4.10
Y.6	69.3	0.262	0.59
Y.14	68.1	0.620	1.79
N.7A	82.1	0.530	0.11
N.8A	60.2	0.397	0.59
N.40	411.1	0.457	12.21
N.60	96.0	0.328	0.20
เฉลี่ย	97.7	0.413	4.57

เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้โดยวิธีต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ค่า %SSE ของ P.77 ได้ค่าต่ำกว่าสถานีอื่น แต่ก็มีค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ($\overline{R_D}$) ที่สูงกว่าสถานีอื่นเช่นกัน โดยรูปที่ 5-16 ง) ได้แสดงให้เห็นว่า เป็นการประเมินที่ได้ค่าสูงเกินจริงอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาสถานี W.4A ซึ่งมีค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ($\overline{R_D}$) ประมาณ 1.08 ถือว่าใกล้เคียง 1 มาก แต่กลับมีค่า %SSE มากถึง 88.5% และมี R^2 ที่ค่อนข้างต่ำเพียง 0.238 โดยในรูปที่ 5-17 ข) แสดงถึงการประเมินที่ค่อนข้างดี อยู่ในแนวเส้น 45 องศา

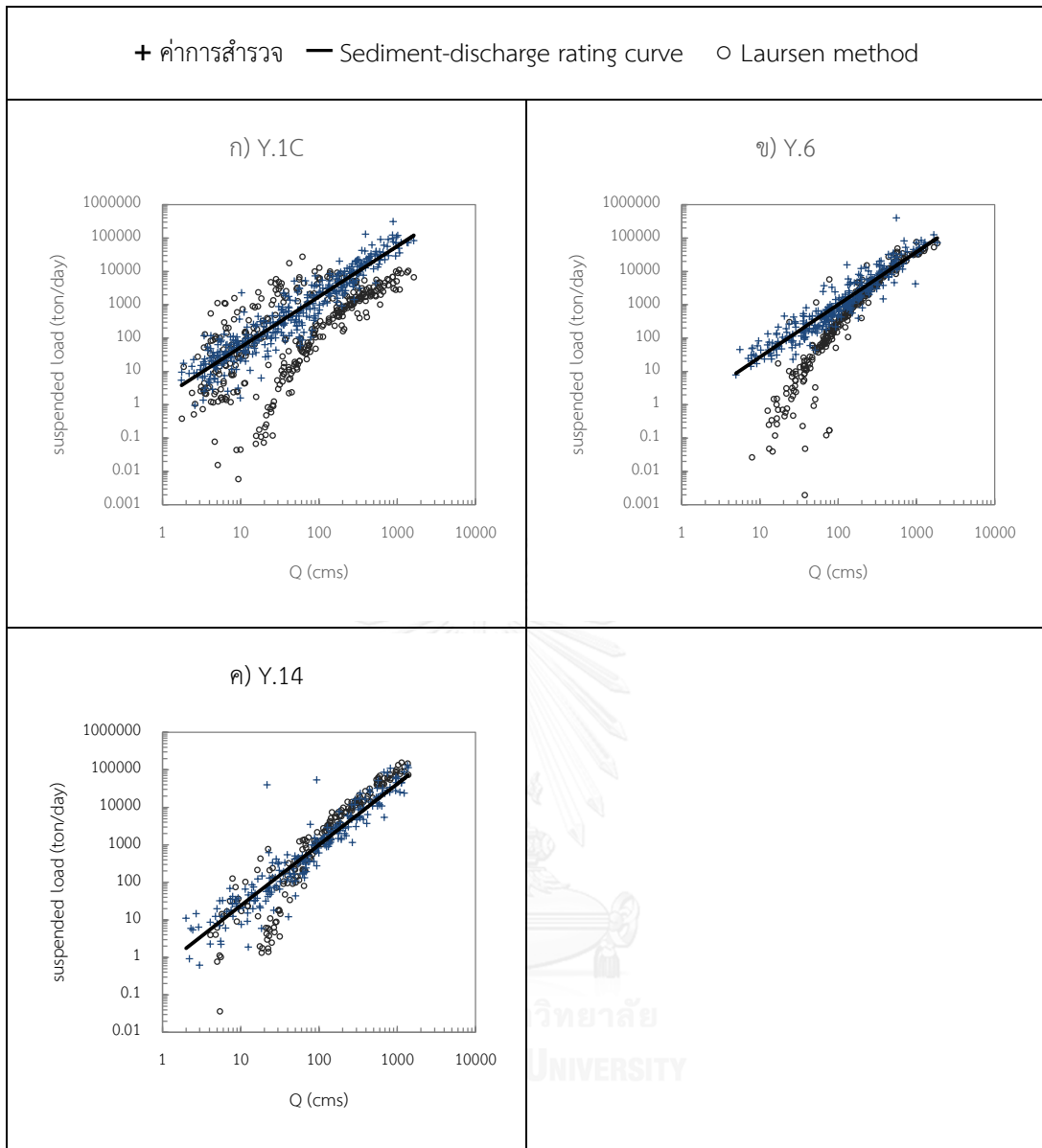
เปรียบเทียบค่าการสำรวจตะกอนแขวนลอย (Q_{so}) กับ ผลการคำนวณโดยวิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (Sediment-discharge rating curve) และวิธีลอเรน (Laursen method) บนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย แสดงดังรูป 5-20 ถึง 5-23



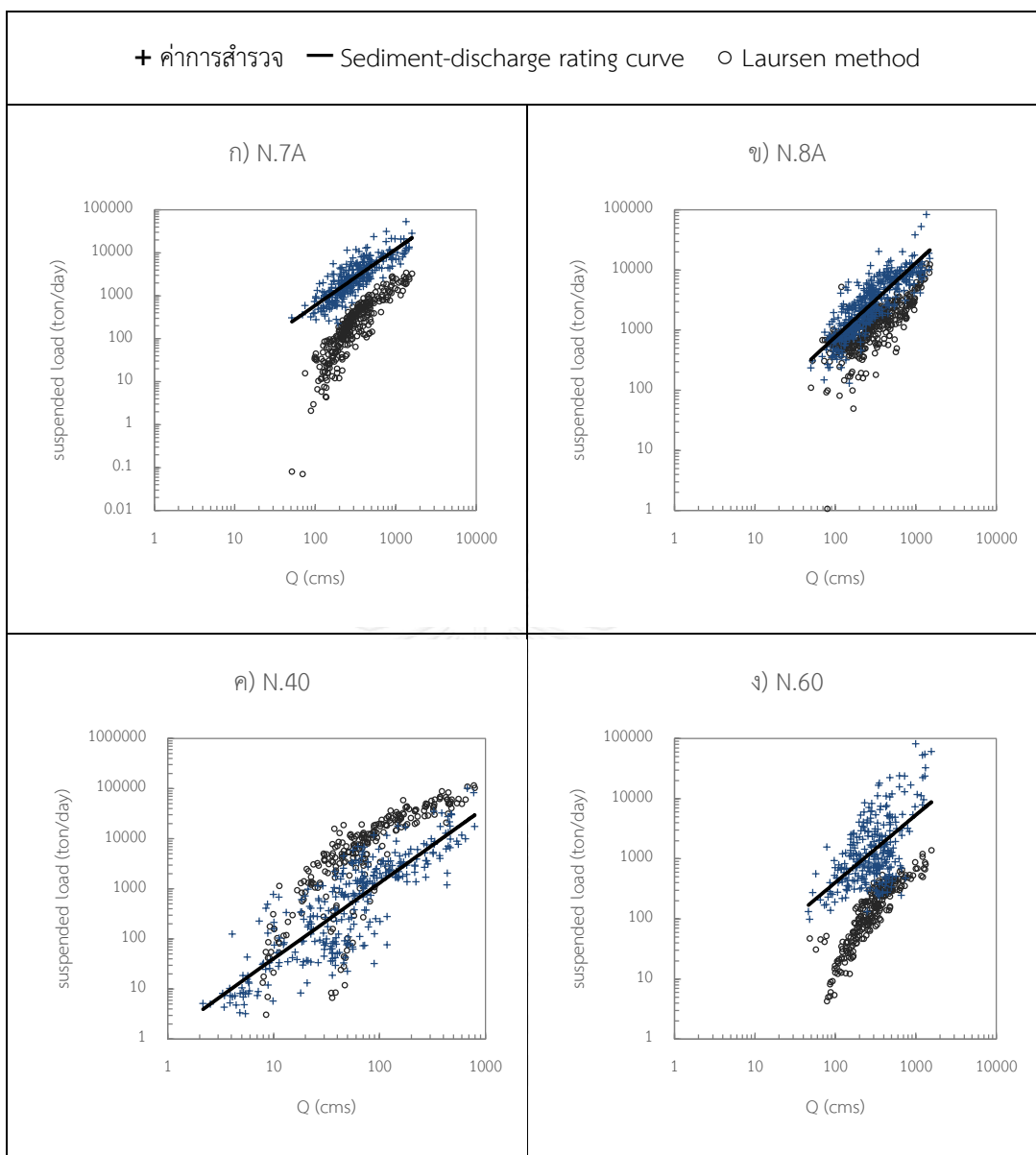
รูปที่ 5-20 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำปิง



รูปที่ 5-21 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย
โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำวัง



รูปที่ 5-22 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย
โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในกลุ่มน้ำยม



รูปที่ 5-23 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย
โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในกลุ่มน้ำน่าน

จากรูปที่ 5-20 ถึงรูปที่ 5-23 แสดงให้เห็นว่า ที่ค่าอัตราการไหลหนึ่ง ๆ วิธีลอร์เซน (Laursen method) ให้ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยได้หลายค่า ขึ้นกับลักษณะทางชลศาสตร์ของลำน้ำ และขนาดวัสดุท้องน้ำที่มีอยู่ โดยจะมีขีดจำกัดของอัตราการไหลต่ำสุดหนึ่ง ๆ ที่จะสามารถประเมินปริมาณตะกอนแขวนลอยได้ เห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 5-20 ก) สถานี P.1 ที่

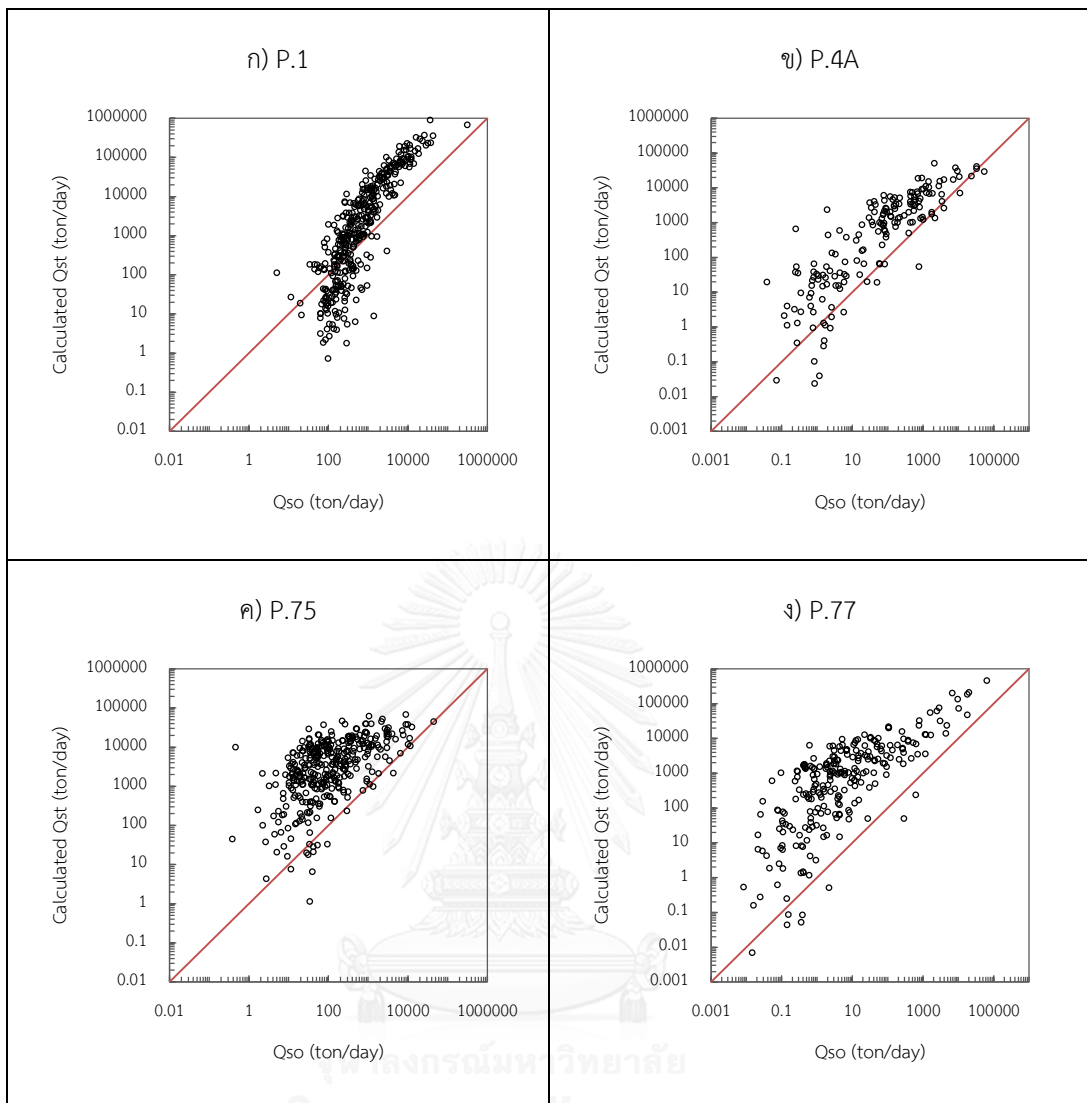
วิธีลอร์เซน ให้ค่าประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำได้เมื่อมีอัตราไหลของน้ำที่สูงกว่า 10 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

5.3.3. วิธีดัดแปลงโค้งของลอร์เซน (modified Laursen curve) ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่าน

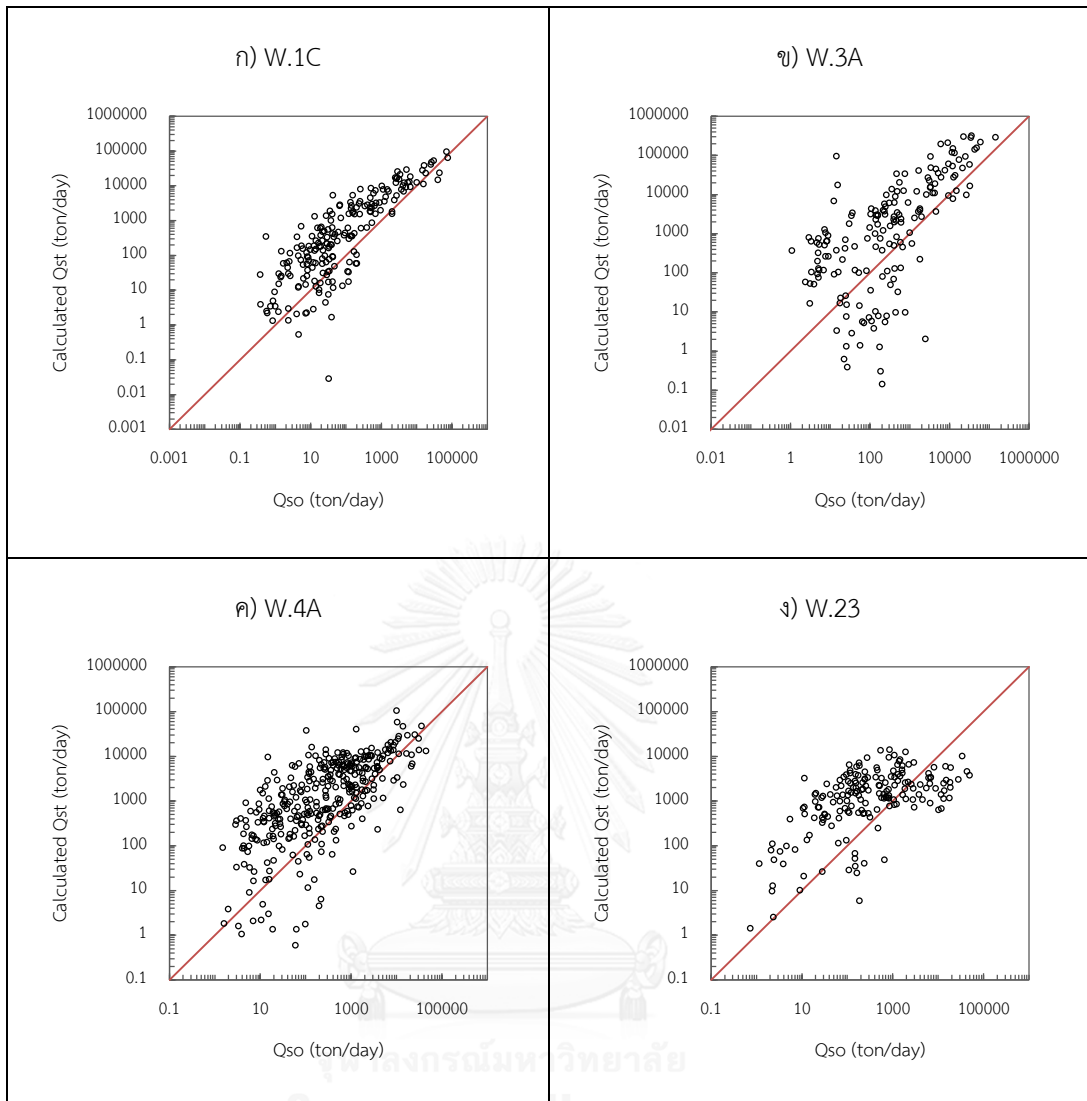
เปรียบเทียบผลการสำรวจตะกอนแขวนลอยของกรมชลประทาน (Q_{so}) กับ ผลการคำนวณโดยวิธีดัดแปลงโค้งของลอร์เซนด้วยข้อมูลแม่น้ำน่าน (modified Laursen curve) (Q_{st}) ของสถานีในกลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่าน ดังแสดงในรูปที่ 5-24 ถึง รูปที่ 5-27 ตามลำดับ และแสดงค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) ที่หาได้ในตารางที่ 5-4

วิธีนี้จะให้ผลการคำนวณที่บางจุดข้อมูลไม่เกิดการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ เช่นเดียวกับผลที่ได้โดยวิธีลอร์เซน (Laursen method) ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.3.2. ดังนั้น สำหรับจุดข้อมูลที่คำนวณได้ค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยเป็นศูนย์นี้ จะไม่ถูกแสดงในรูปที่ 5-24 ถึง รูปที่ 5-27

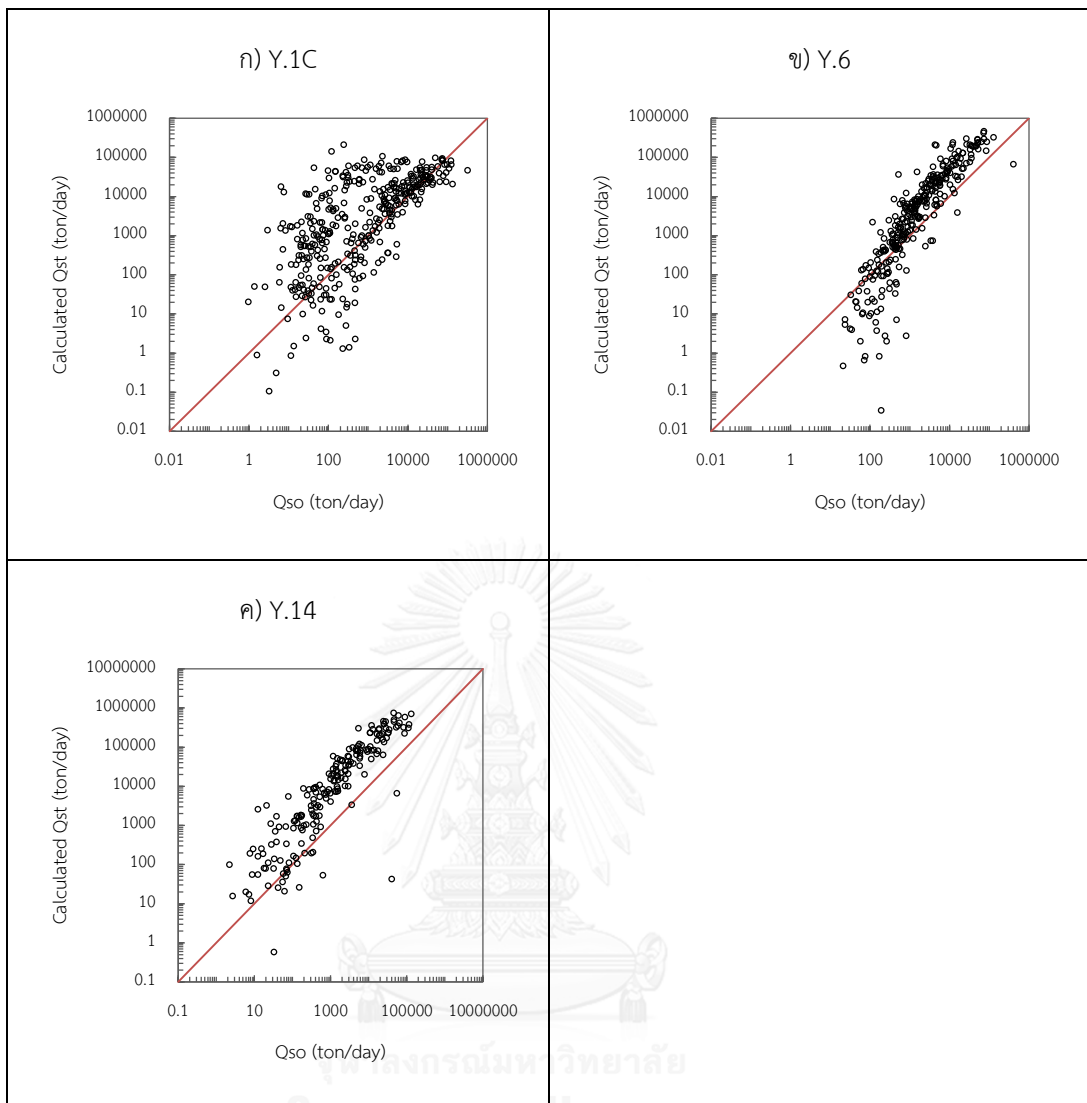
พิจารณารูปเปรียบเทียบผลการสำรวจจริง กับ ผลการคำนวณโดยวิธีดัดแปลงโค้งของ Laursen พบว่า สถานีในกลุ่มน้ำปิง ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม และลุ่มน้ำน่าน ล้วนให้ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่สูงกว่าผลการสำรวจอย่างชัดเจน ยกเว้นของสถานี N.7A และ N.60 ที่ให้ผลการประเมินค่อนข้างดี จึงสรุปได้ว่า วิธีดัดแปลงโค้ง Laursen ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่าน ไม่สามารถให้ผลการประเมินที่ดีของอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวมของทั้ง 4 แม่น้ำได้ โดยจะให้ผลดีในบางสถานีเท่านั้น



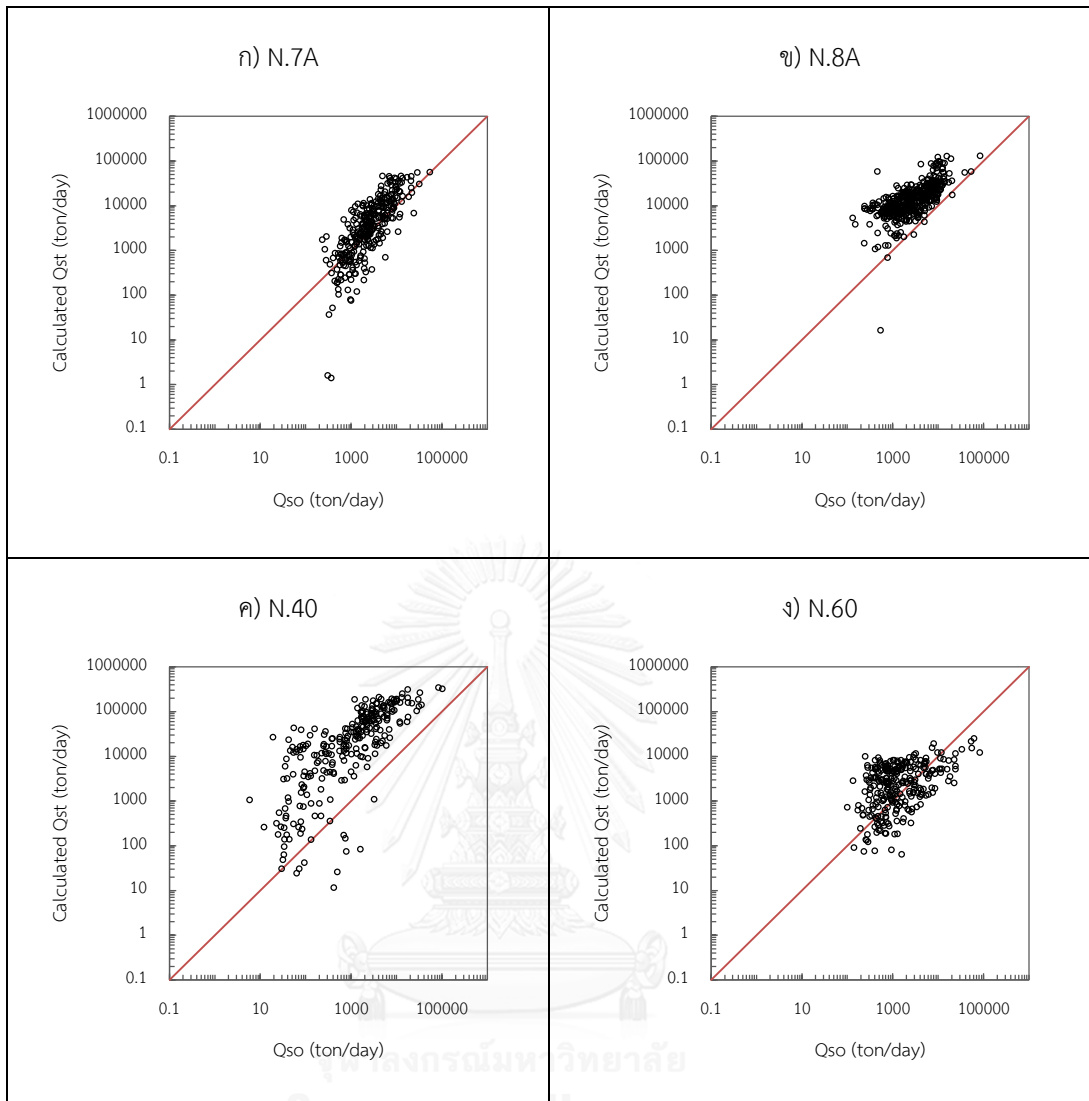
รูปที่ 5-24 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก modified Laursen curve ของสถานีในกลุ่มน้ำปีง



รูปที่ 5-25 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก modified Laursen curve ของสถานีในลุ่มน้ำวัง



รูปที่ 5-26 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก modified Laursen curve ของสถานีในกลุ่มน้ำวังยม



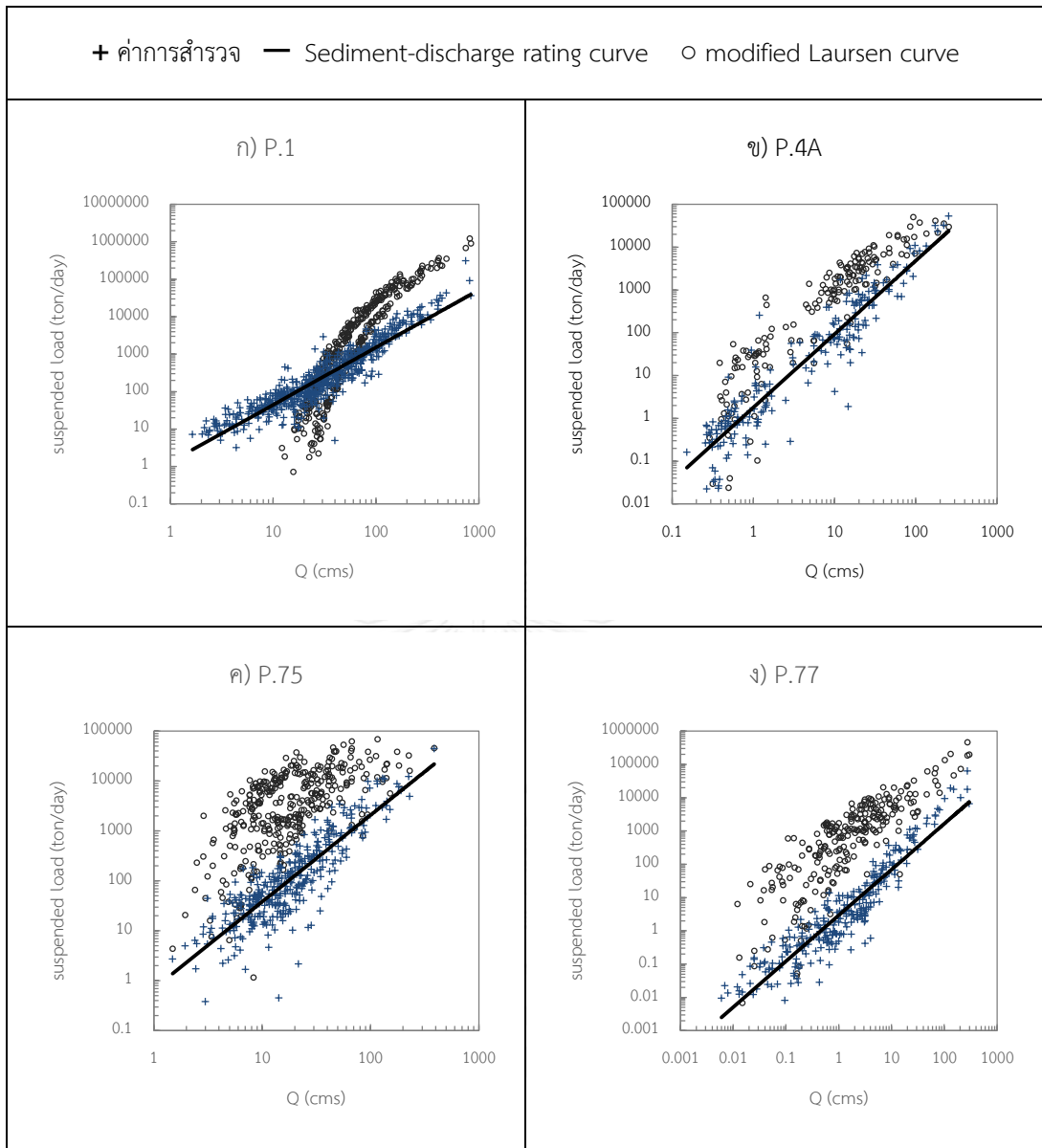
รูปที่ 5-27 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จาก modified Laursen curve ของสถานีในลุ่มน้ำ่าน

ตารางที่ 5-4 ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี ที่คำนวณโดยวิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เซนด้วย ข้อมูลแม่น้ำน่าน (modified Laursen curve)

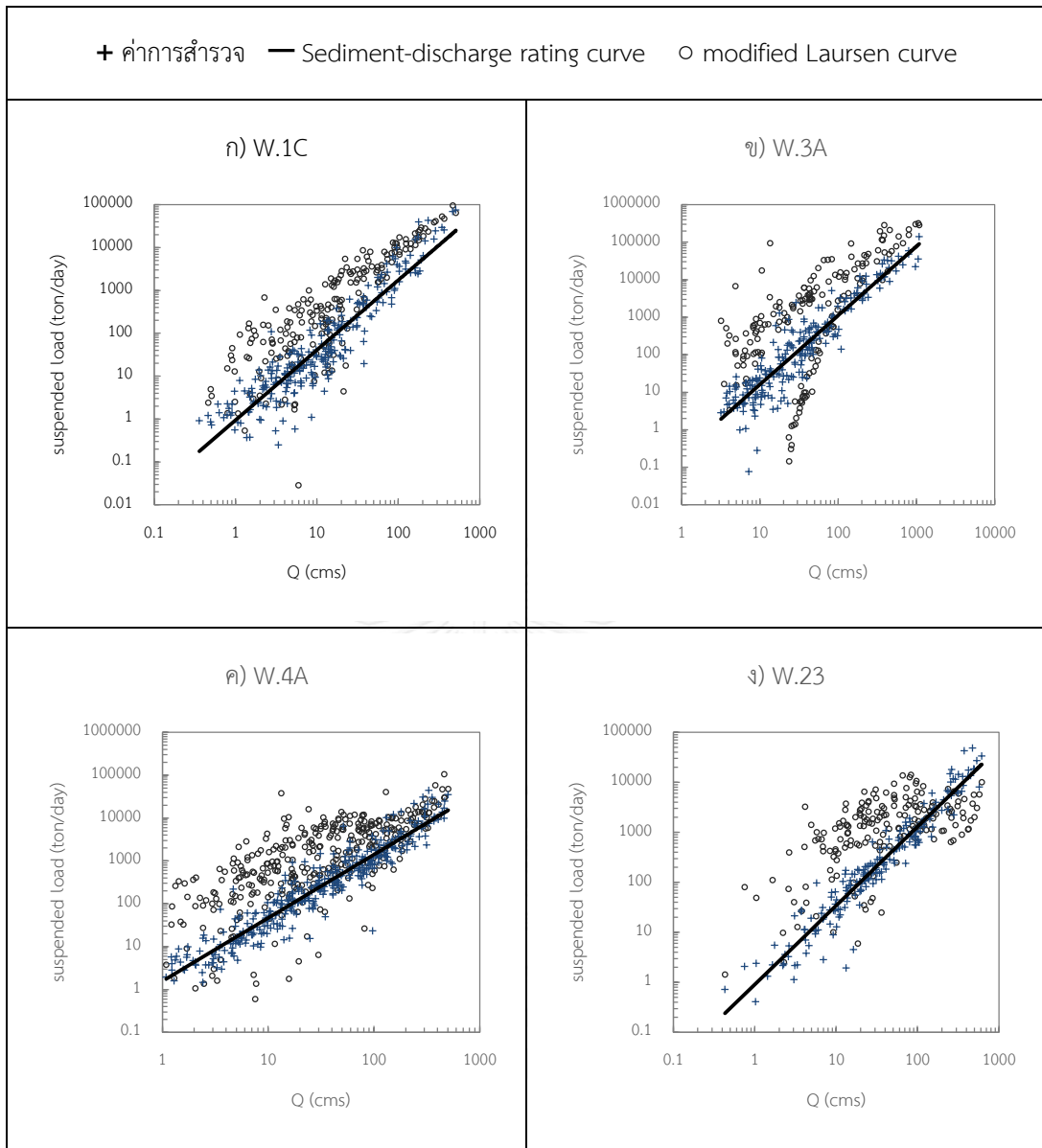
สถานี	%SSE	R^2	$\overline{R_D}$
P.1	2775.6	0.438	4.03
P.4A	114.6	0.447	37.09
P.75	1596.1	0.179	141.03
P.77	5638.9	0.860	566.17
W.1C	41.8	0.756	12.51
W.3A	1258.2	0.518	54.96
W.4A	243.9	0.248	19.13
W.23	87.1	0.044	12.84
Y.1C	116.4	0.155	44.91
Y.6	567.4	0.263	3.90
Y.14	4012.9	0.621	12.06
N.7A	161.2	0.529	1.88
N.8A	858.1	0.396	7.08
N.40	5540.1	0.447	41.01
N.60	59.1	0.332	3.43
เฉลี่ย	1538.1	0.416	64.14

ความคลาดเคลื่อนที่หาได้ แสดงถึงผลการประเมินที่ได้ยังไม่ดีนัก มีค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (%SSE) ที่สูงอย่างชัดเจน และค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ($\overline{R_D}$) ที่สูงเกินกว่า 1 หลายเท่าตัว แสดงว่าการประเมินให้ค่าที่สูงเกินจริงเป็นส่วนใหญ่

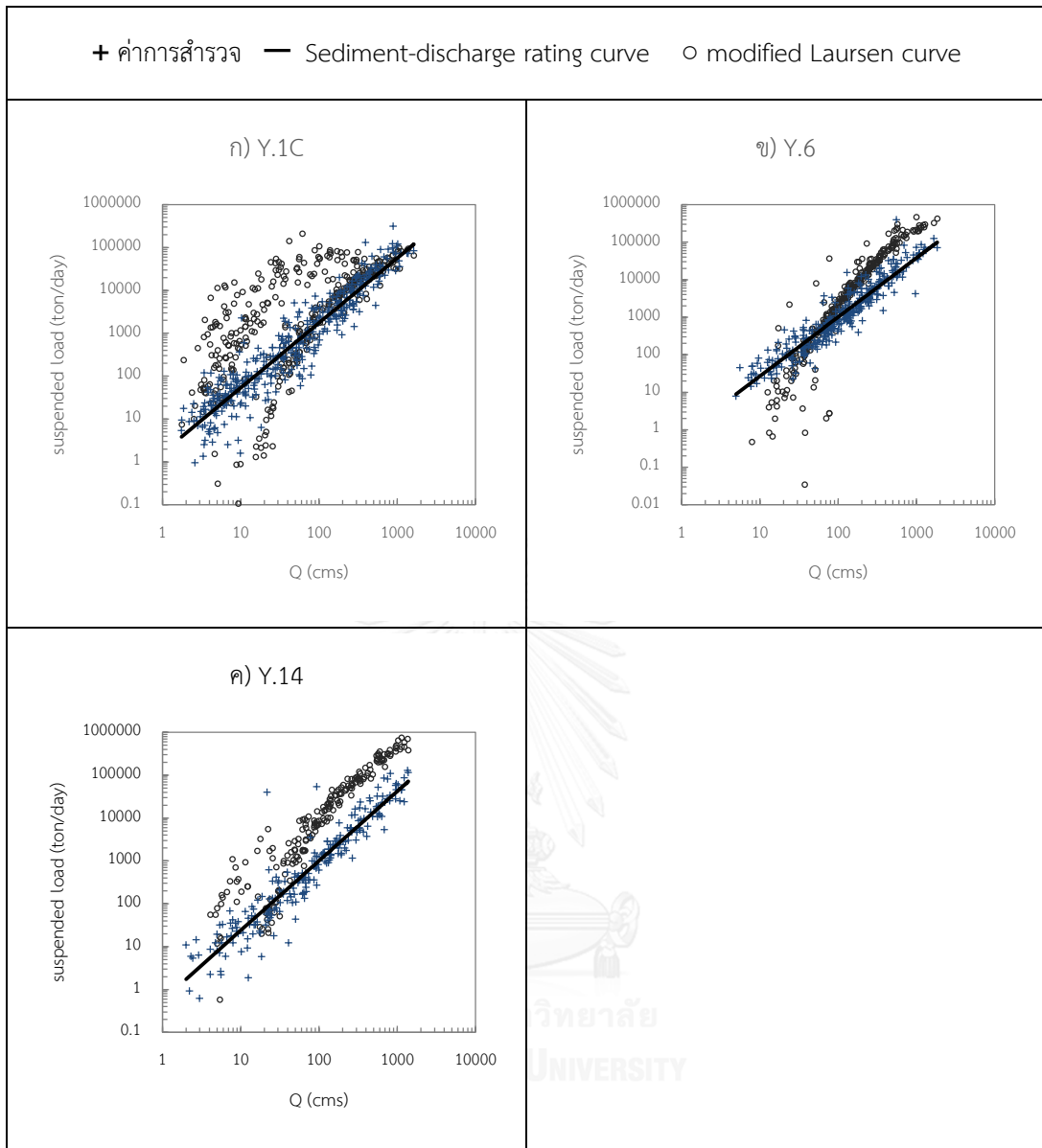
เปรียบเทียบค่าการสำรวจ กับ ผลการคำนวณด้วย Sediment-discharge rating curve และ modified Laursen curve บนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่แสดงดังรูป 5-28 ถึง 5-31



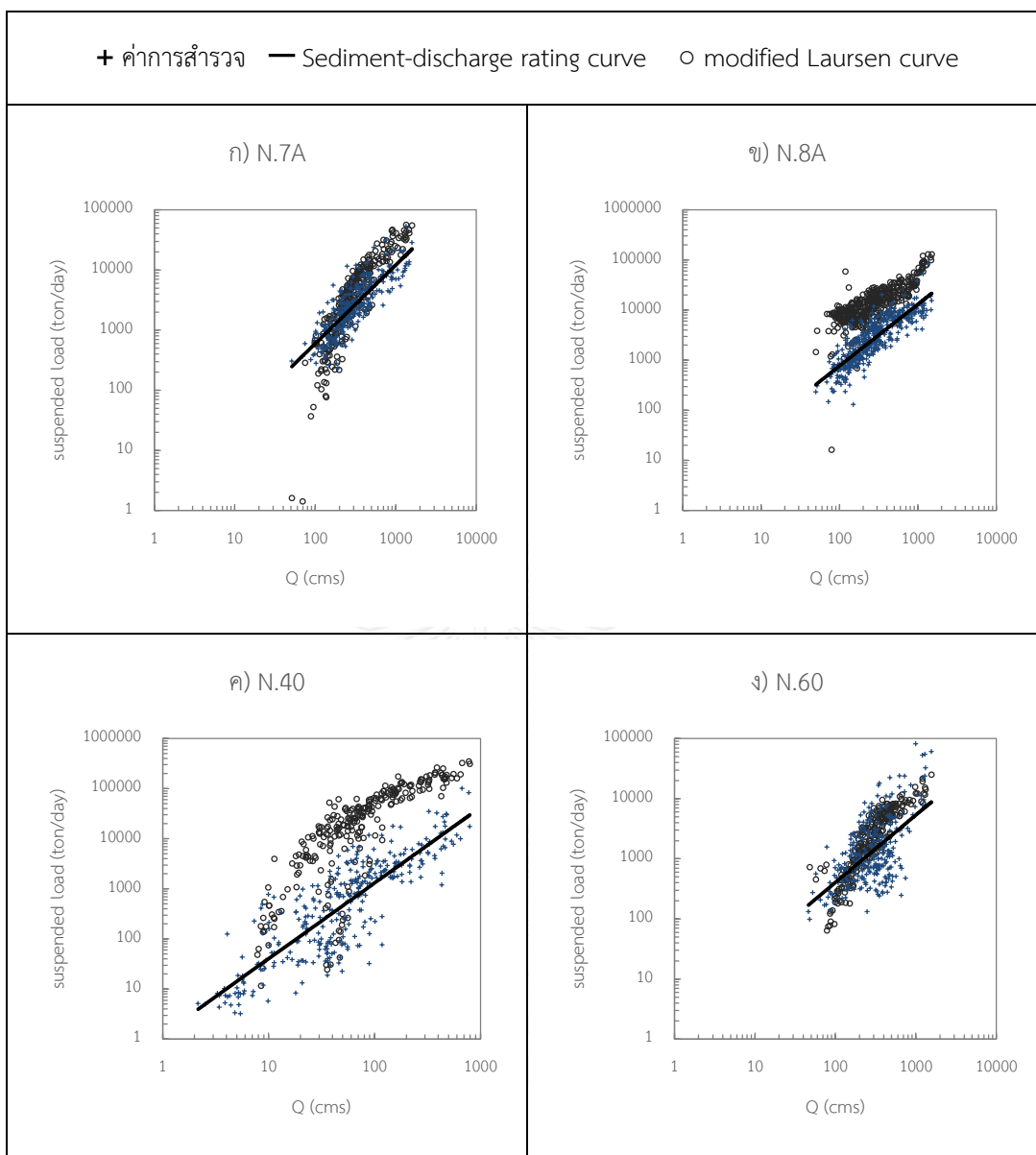
รูปที่ 5-28 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย
โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในกลุ่มน้ำปิง



รูปที่ 5-29 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย
โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในลุ่มน้ำวัง



รูปที่ 5-30 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย
โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในกลุ่มน้ำยม



รูปที่ 5-31 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย
โดยวิธีต่าง ๆ ของสถานีในกลุ่มน้ำน่าน

จากรูปที่ 5-28 ถึงรูปที่ 5-31 แสดงถึงขีดจำกัดของอัตราการไหลต่ำสุดหนึ่ง ๆ ที่จะสามารถ
ประเมินปริมาณตะกอนแขวนลอยได้ และยังเปรียบเทียบให้เห็นผลการประมาณด้วย modified
Laursen curve ที่ส่วนใหญ่ให้ผลที่สูงเกินจริงได้อย่างชัดเจน

5.3.4. วิธีลอร์เซนดัดแปลงโดยแมดเดน (Madden's modification of Laursen method)

จากผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมโดยวิธีลอร์เซน (Laursen method) และวิธีดัดแปลงโค้งของลอร์เซน (modified Laursen curve) ที่พบว่า มีบางจุดข้อมูลไม่พบการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ จึงมีอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (Q_b) เป็นศูนย์ และมีอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (Q_t) เท่ากับศูนย์เช่นกัน ผลการคำนวณจึงไม่พบอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยเกิดขึ้น แต่จากผลการสำรวจพบค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย (Q_{st}) ที่มากกว่าศูนย์ แสดงว่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่วัดได้จริงของกรมชลประทานนี้ มาจาก 2 ส่วน คือ ส่วนที่มาจากวัสดุท้องน้ำ และ ส่วนอื่น ๆ ที่ไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำ หรืออาจเรียกตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) ดังนั้น ในการวิเคราะห์อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมในที่นี้ จึงพิจารณาเฉพาะส่วนที่คำนวณพบวัสดุท้องน้ำมีการเคลื่อนที่ และประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม โดยการคูณด้วยค่าปรับแก้

เนื่องจากปริมาณตะกอนรวมที่เกิดขึ้นของแต่ละแม่น้ำ มีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ กัน เมื่อคำนวณด้วยวิธีการดัดแปลงโค้งของ Laursen ในหัวข้อ 5.3.3. จะเห็นได้ว่า วิธีการดังกล่าวไม่สามารถใช้ได้ดีกับทุกแม่น้ำ จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาค่าปรับแก้ ให้ได้ผลการประเมินในช่วงที่ใกล้เคียงกับผลการสำรวจของแต่ละลุ่มน้ำยิ่งขึ้น โดยจะแยกพิจารณาเป็นรายลุ่มน้ำ 4 ลุ่มน้ำ คือ ลุ่มน้ำปิง ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม และลุ่มน้ำน่าน และพิจารณารายพื้นที่ภาคเหนือ

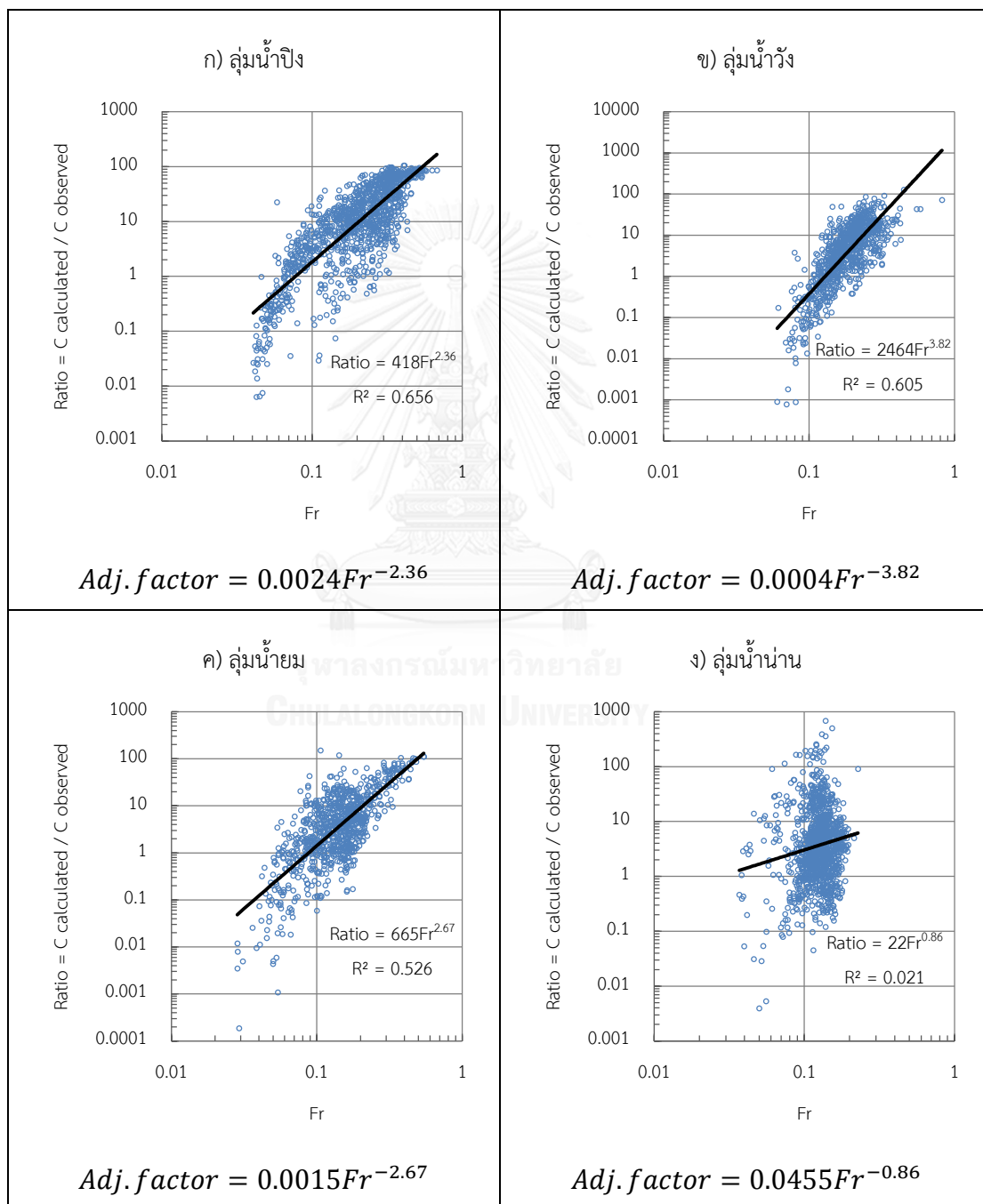
จากจุดข้อมูลทั้ง 15 สถานี นำจุดข้อมูลเฉพาะที่พบการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำมาวิเคราะห์หาพจน์ตัวคูณที่จะมาเป็นค่าปรับแก้ของแต่ละลุ่มน้ำ การพิจารณาความสัมพันธ์ของเลข Froude number กับสัดส่วนระหว่างผลการคำนวณปริมาณตะกอนรวม¹ กับผลการสำรวจปริมาณตะกอนรวม² ($C_{calculated} / C_{observed}$) พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (pearson correlation coefficient, R) ที่มีค่าเป็นบวกและอยู่ในเกณฑ์ดี ยกเว้นของลุ่มน้ำน่าน ที่ตัวแปรทั้งสองแทบจะไม่มีความสัมพันธ์กันเลย แสดงค่าดังนี้

ลุ่มน้ำปิง	มี $R = 0.757$
ลุ่มน้ำวัง	มี $R = 0.585$
ลุ่มน้ำยม	มี $R = 0.705$
ลุ่มน้ำน่าน	มี $R = -0.001$

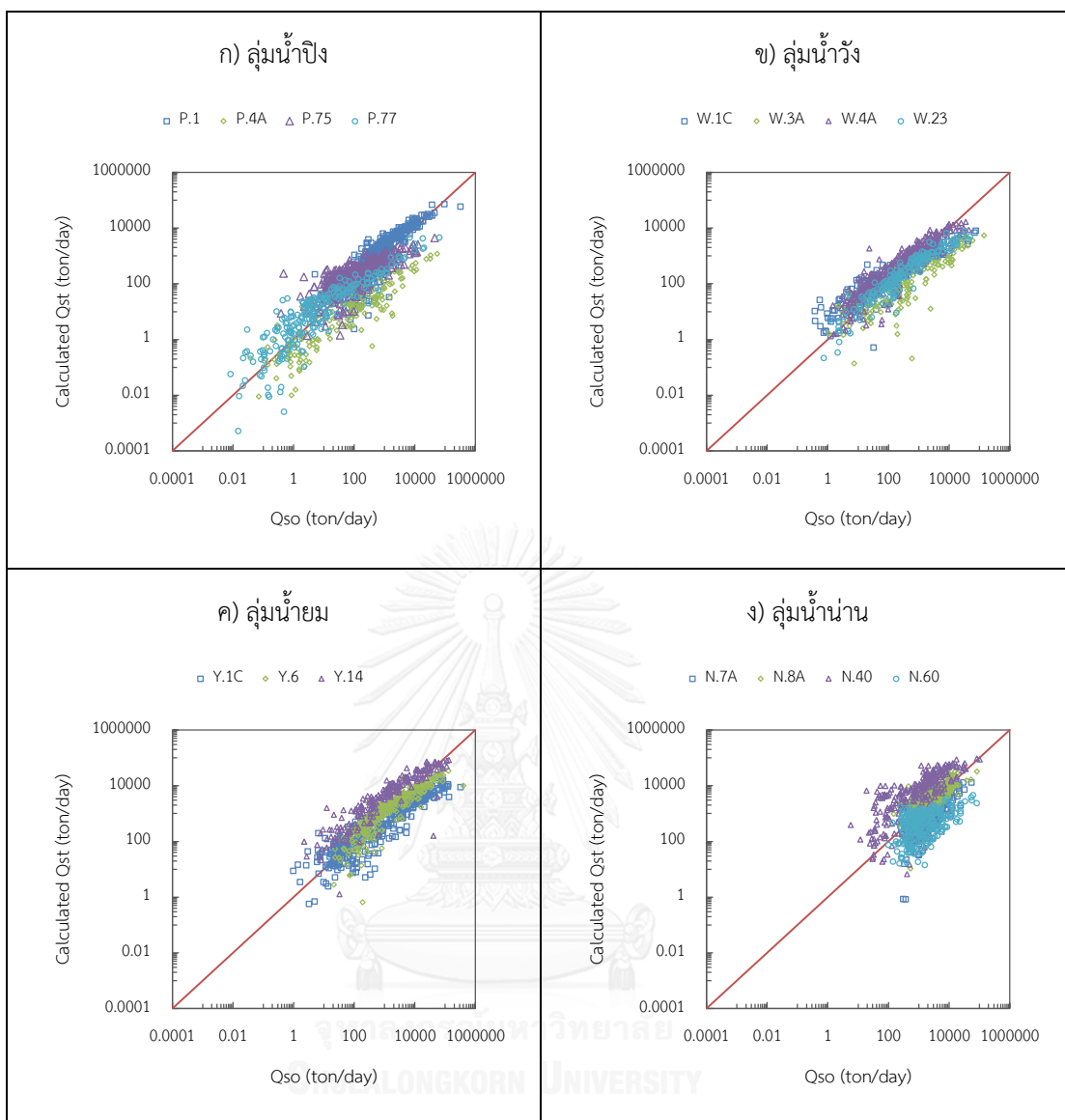
¹ ผลการคำนวณปริมาณตะกอนรวม ($C_{calculated}$) โดยวิธีลอร์เซนดัดแปลงด้วยข้อมูลแม่น้ำน่าน

² ผลการสำรวจปริมาณตะกอนรวม ($C_{observed}$) เป็นผลรวมของผลการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำ (Q_b) ในหัวข้อ 5.2. กับ ผลการสำรวจตะกอนแขวนลอย (Q_{so})

แสดงผลการพิจารณาสมการของตัวคูณค่าปรับแก้ (Equation for adjustment factor) รายลุ่มน้ำ ดังรูปที่ 5-32 และแสดงการเปรียบเทียบผลการสำรวจ (Q_{so}) กับผลการประเมินตะกอนแขวนลอยรวม (Q_{st}) โดยวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden ของสถานีในลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่าน ในรูปที่ 5-33



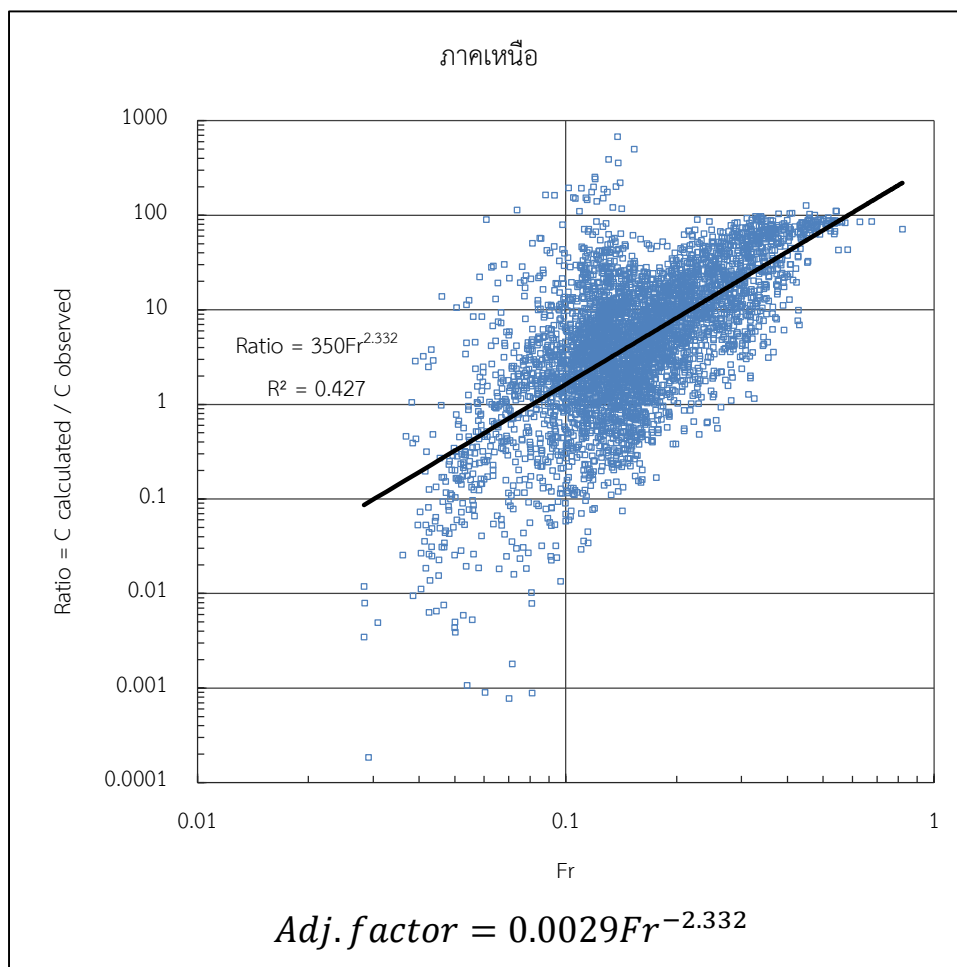
รูปที่ 5-32 สมการของตัวคูณค่าปรับแก้ (Equation for adjustment factor) รายพื้นที่ลุ่มน้ำ



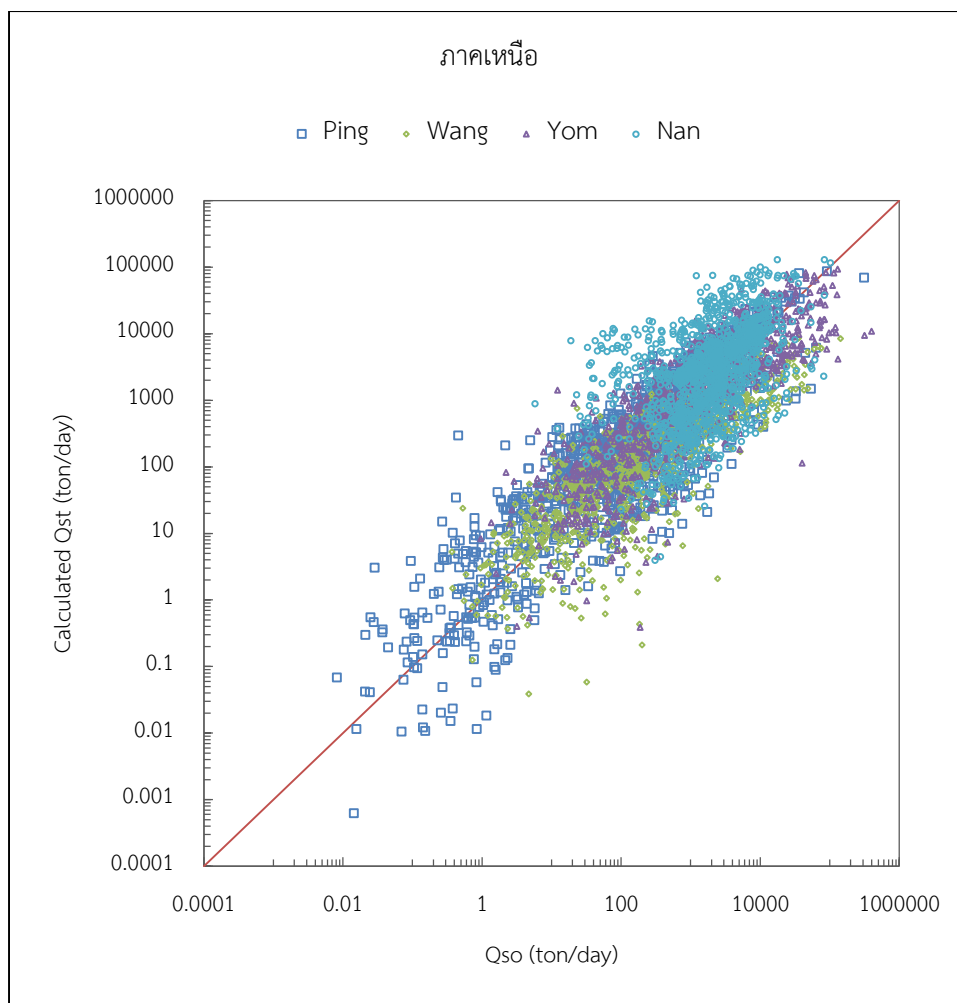
รูปที่ 5-33 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จากวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden รายลุ่มน้ำ

พิจารณารูปที่ 5-33 จะเห็นว่า ผลการประเมินอยู่ในแนวของเส้น 45 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มผลการสำรวจและผลการประเมินที่ไปในทางเดียวกัน โดยในลุ่มน้ำน่านจะมีช่วงความคลาดเคลื่อนของการประเมินที่กว้างกว่าในลุ่มน้ำอื่น ๆ สัมพันธ์กับค่า %SSE ซึ่งแสดงในตารางที่ 5-5 ซึ่งแม่น้ำน่านมีค่าสูงสุด

แสดงผลการพิจารณาสมการของตัวคูณค่าปรับแก้ (Equation for adjustment factor) ของภาคเหนือ ดังรูปที่ 5-34 และแสดงการเปรียบเทียบผลการสำรวจจริง กับผลการคำนวณโดยวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden รายลุ่มน้ำ ของสถานีในลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่าน ในรูปที่ 5-35



รูปที่ 5-34 สมการของตัวคูณค่าปรับแก้ (Equation for adjustment factor) รายพื้นที่ภาคเหนือ



รูปที่ 5-35 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จากวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden รายพื้นที่ภาคเหนือ

ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) ที่ได้จากการคำนวณรายพื้นที่ลุ่มน้ำ และรายพื้นที่ภาคเหนือ แสดงดังตารางที่ 5-5 ส่วนผลการคำนวณความคลาดเคลื่อนแยกรายสถานีของทั้งการคำนวณรายพื้นที่ลุ่มน้ำ และรายพื้นที่ภาค แสดงดังตารางที่ 5-6

สังเกตได้ว่า การประเมินด้วยสมการรายพื้นที่ภาค ส่วนใหญ่ให้ค่า %SSE ต่ำกว่าการประเมินด้วยสมการรายพื้นที่ลุ่มน้ำ แต่การประเมินด้วยสมการรายพื้นที่ลุ่มน้ำกลับมีค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (\bar{R}_D) ที่ใกล้เคียง 1 มากกว่าในหลาย ๆ สถานี โดยทั้งสมการรายพื้นที่ลุ่มน้ำ และสมการรายพื้นที่ภาค ก็ให้ผลการประเมินที่ไม่ต่างกันมากนัก จากรูปที่ 5-33 และ รูปที่ 5-35 แสดงให้เห็นผลการประเมินที่ค่อนข้างดี จุดข้อมูลกระจายตามแนวเส้น 45 องศา

ตารางที่ 5-5 ค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden ของการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม ร่ายลุ่มน้ำ และร่ายภาค

	ลุ่มน้ำ	%SSE	R ²
ร่ายพื้นที่ลุ่มน้ำ	ปัง	61.0	0.405
	วัง	77.1	0.290
	ยม	72.1	0.217
	น่าน	126.1	0.208
ร่ายพื้นที่ภาค	ภาคเหนือ	87.2	0.166

ตารางที่ 5-6 ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี ที่คำนวณด้วยวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden ของการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม ร่ายลุ่มน้ำ และร่ายภาค

สถานี	ร่ายพื้นที่ลุ่มน้ำ			ร่ายพื้นที่ภาคเหนือ		
	%SSE	R ²	\overline{R}_D	%SSE	R ²	\overline{R}_D
P.1	57.9	0.441	2.24	56.0	0.441	2.54
P.4A	94.6	0.885	0.42	93.1	0.858	0.62
P.75	73.8	0.588	4.73	70.0	0.580	5.77
P.77	81.8	0.621	3.44	77.0	0.648	5.11
W.1C	77.7	0.755	3.39	82.4	0.774	1.75
W.3A	89.3	0.711	0.51	84.2	0.694	0.41
W.4A	39.2	0.606	2.72	64.9	0.516	1.67
W.23	68.2	0.687	0.89	89.0	0.553	0.65
Y.1C	83.7	0.541	1.17	82.9	0.532	1.51
Y.6	75.9	0.313	1.26	73.7	0.310	1.17
Y.14	33.5	0.652	6.08	36.2	0.653	5.51
N.7A	42.8	0.543	0.50	35.4	0.553	0.70
N.8A	41.4	0.422	1.82	66.0	0.444	2.39
N.40	278.1	0.456	14.03	643.9	0.449	22.93
N.60	87.3	0.372	0.60	88.0	0.422	0.53
เฉลี่ย	81.7	0.573	2.92	109.5	0.562	3.55

5.4. ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยวิธีเชิงกลศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts)

5.4.1. การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ

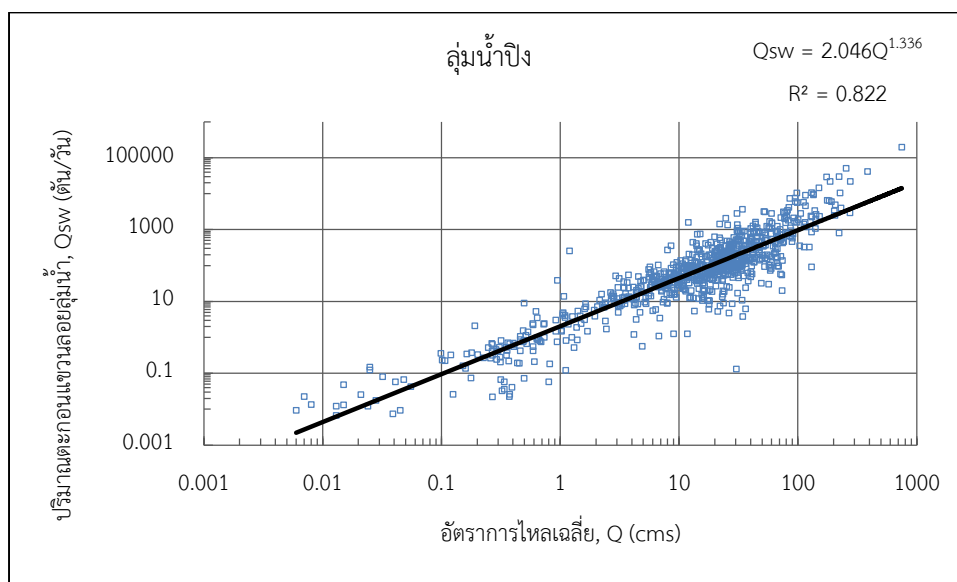
การศึกษานี้ แบ่งการพิจารณาเป็นรายพื้นที่ลุ่มน้ำ 4 ลุ่มน้ำ และรายพื้นที่ภาค จากผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ (Q_{sb}) ในหัวข้อที่ 5.3.2 พบว่าวิธี Laursen method ไม่ได้ให้ผลการประเมินค่า (Q_{sb}) ที่น้อยกว่าผลการสำรวจของกรมชลประทาน (Q_{so}) ในทุกชุดข้อมูลเสมอไป จึงใช้เฉพาะชุดข้อมูลที่มีค่า Q_{sb} น้อยกว่าค่า Q_{so} และได้สรุปจำนวนชุดข้อมูลที่นำมาใช้ในวิธีเชิงกลศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน ดังตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5-7 จำนวนชุดข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

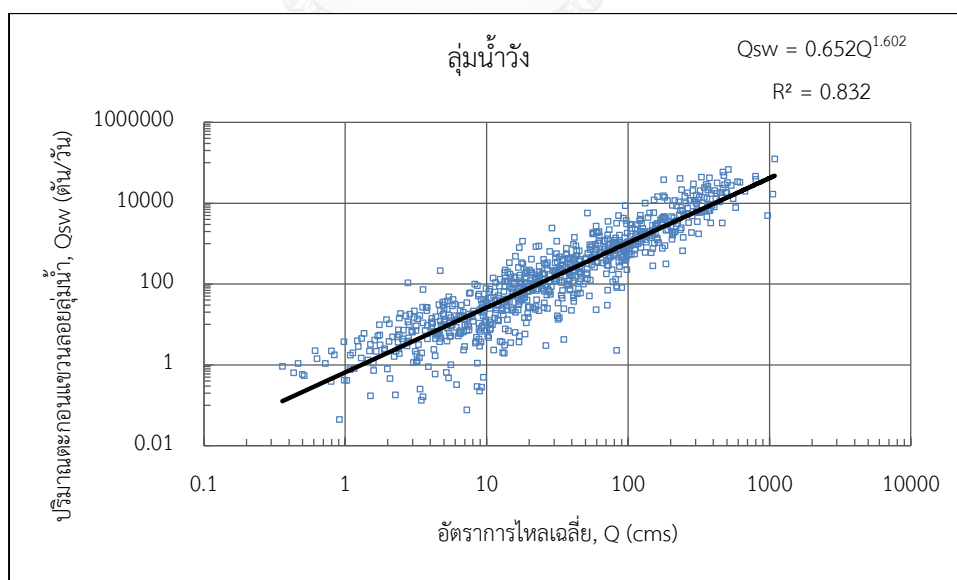
สถานี	จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด	จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้*
P.1	609	480
P.4A	210	154
P.75	367	151
P.77	271	73
W.1C	248	203
W.3A	222	168
W.4A	358	271
W.23	198	156
Y.1C	395	296
Y.6	331	285
Y.14	228	102
N.7A	310	310
N.8A	456	399
N.40	314	76
N.60	282	276
*จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ นับเฉพาะชุดข้อมูลที่มีผลการคำนวณด้วยวิธีลอร์เซน (Laursen method) (Q_{sb}) ได้ค่าน้อยกว่าผลการสำรวจ (Q_{so})		

ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) ด้วยแนวคิดเชิงอุทกวิทยา (hydrologic concept) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำ (Q) กับอัตราการ

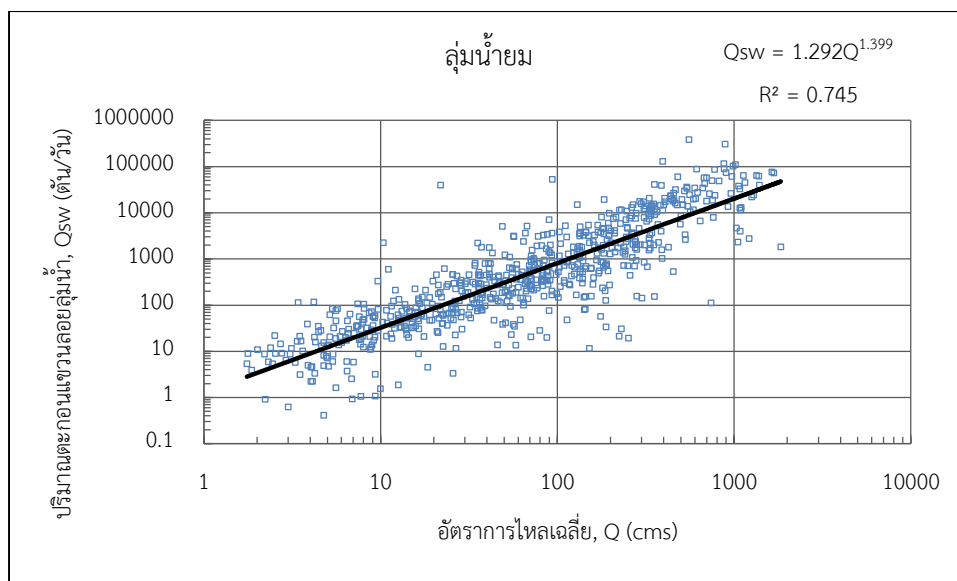
เคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) ของลุ่มน้ำปิง ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม และลุ่มน้ำน่าน แสดงผลดังรูปที่ 5-36 ถึง รูปที่ 5-39



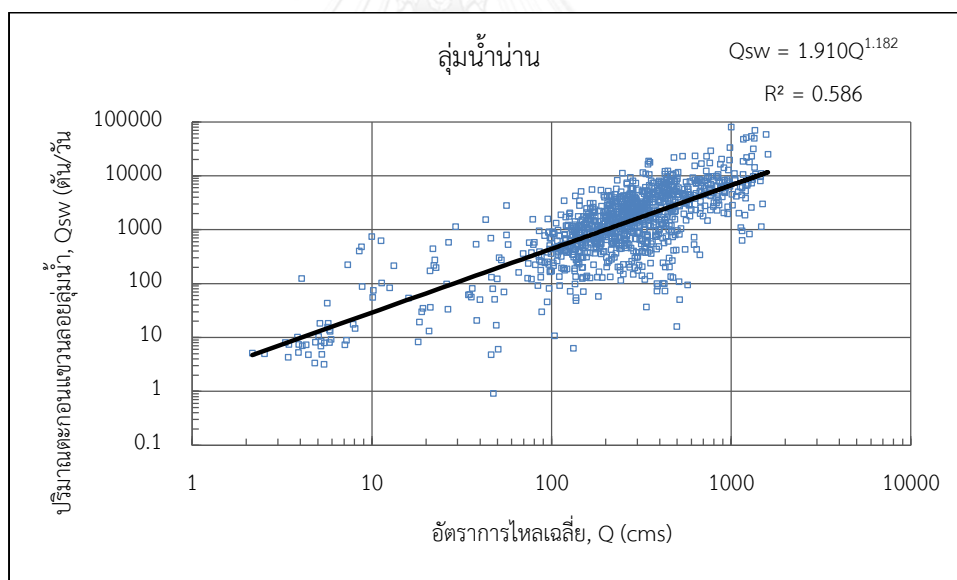
รูปที่ 5-36 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) ของลุ่มน้ำปิง



รูปที่ 5-37 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) ของลุ่มน้ำวัง



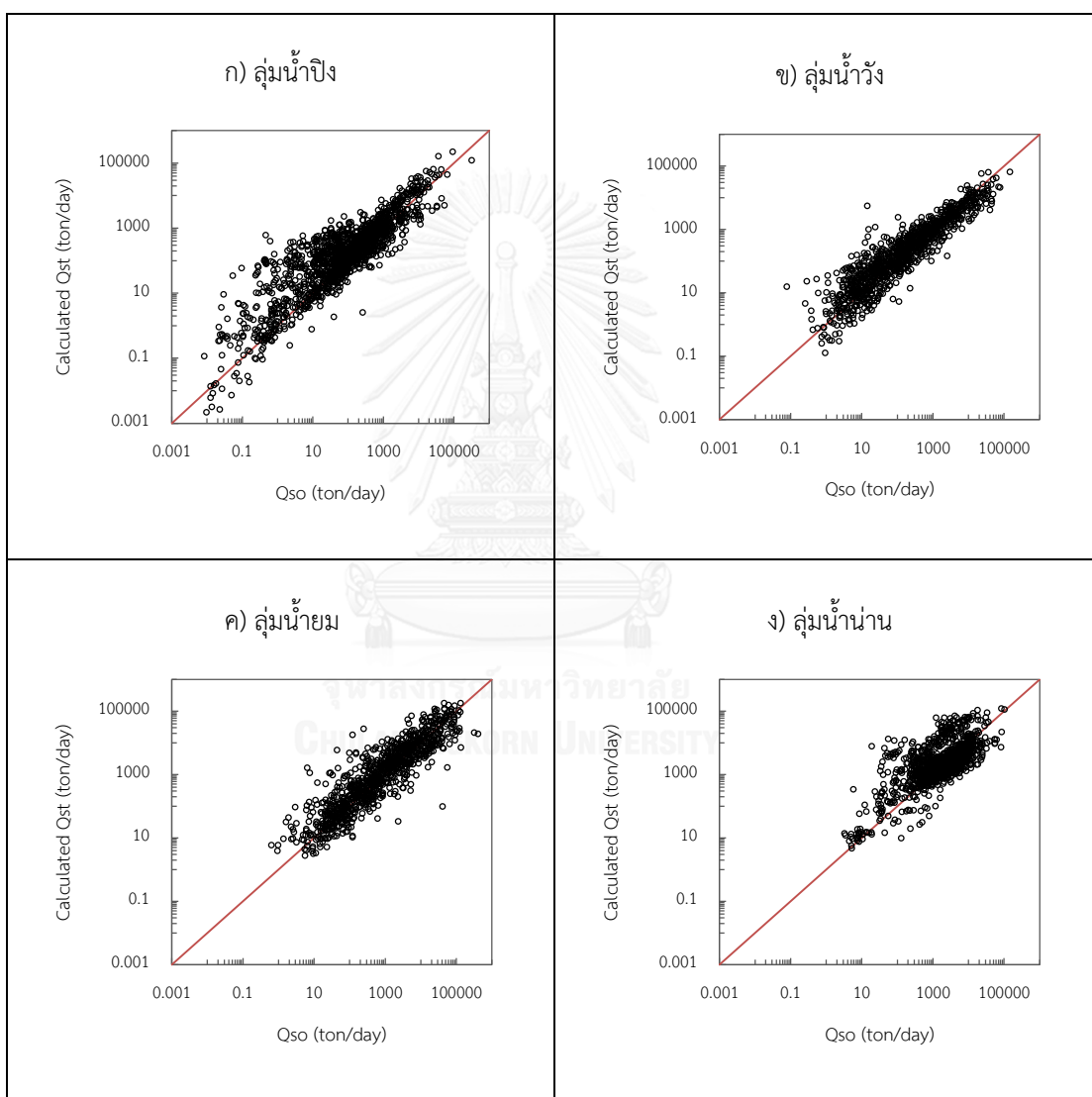
รูปที่ 5-38 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยกลุ่มน้ำ (Q_{sw})
ของกลุ่มน้ำยม



รูปที่ 5-39 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยกลุ่มน้ำ (Q_{sw})
ของกลุ่มน้ำน่าน

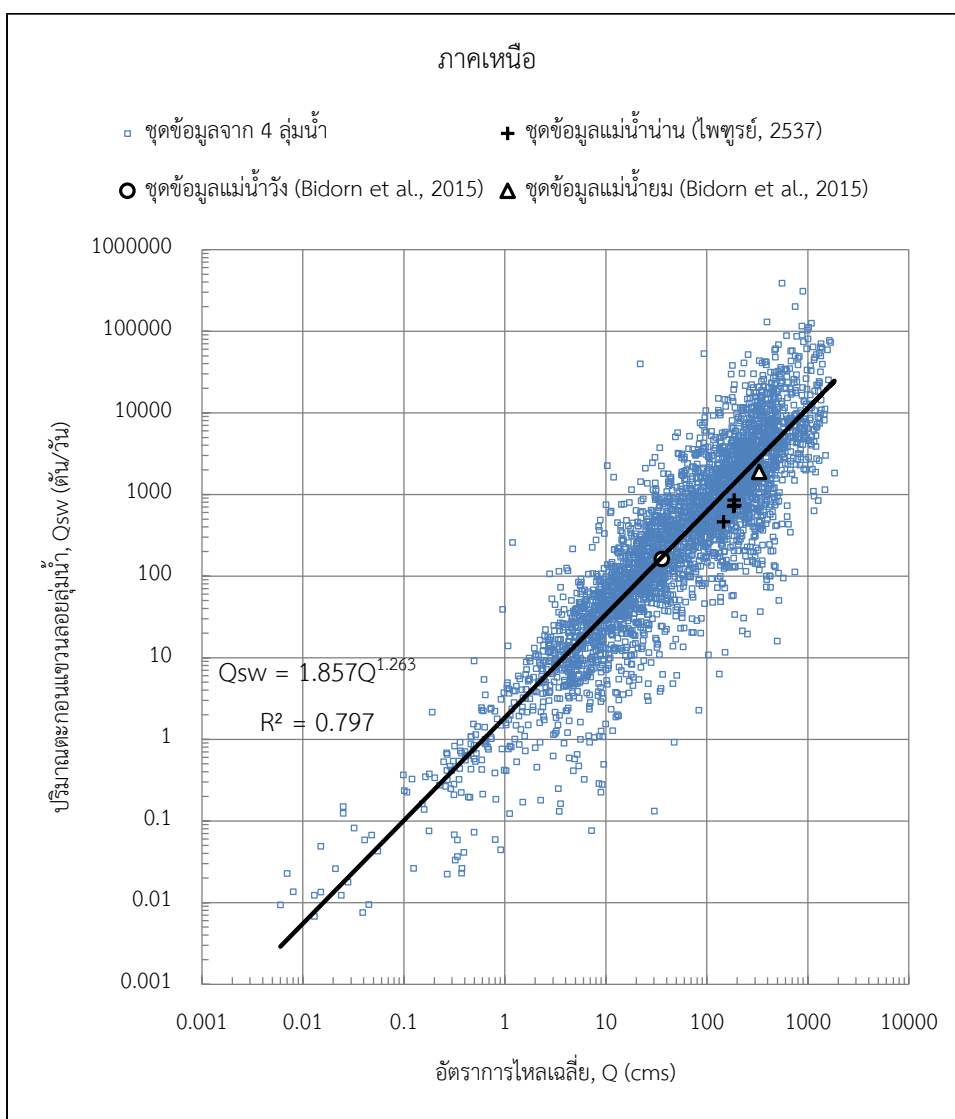
ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำ กับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยกลุ่มน้ำที่วิเคราะห์ได้ของกลุ่มน้ำปิง กลุ่มน้ำวัง และกลุ่มน้ำน่าน มีค่า R^2 ที่ค่อนข้างสูง ส่วนของกลุ่มน้ำน่าน R^2 ที่ได้ไม่สูงมากนัก

เปรียบเทียบผลการสำรวจตะกอนแขวนลอยของกรมชลประทาน (Q_{so}) กับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม (Q_{st}) ซึ่งได้จากผลรวมของค่าการประเมินปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) จากสมการของกลุ่มน้ำนั้น ๆ กับค่าการประเมินตะกอนแขวนลอย (Q_{sb}) โดยวิธีลอเรน (Laursen method) แสดงผลดังรูปที่ 5-4 จากรูปพบว่า ผลการประเมินที่ได้ค่อนข้างดี สูงกว่าผลการสำรวจเพียงเล็กน้อย โดยรวมถือว่าให้ผลการประเมินที่ค่อนข้างดี



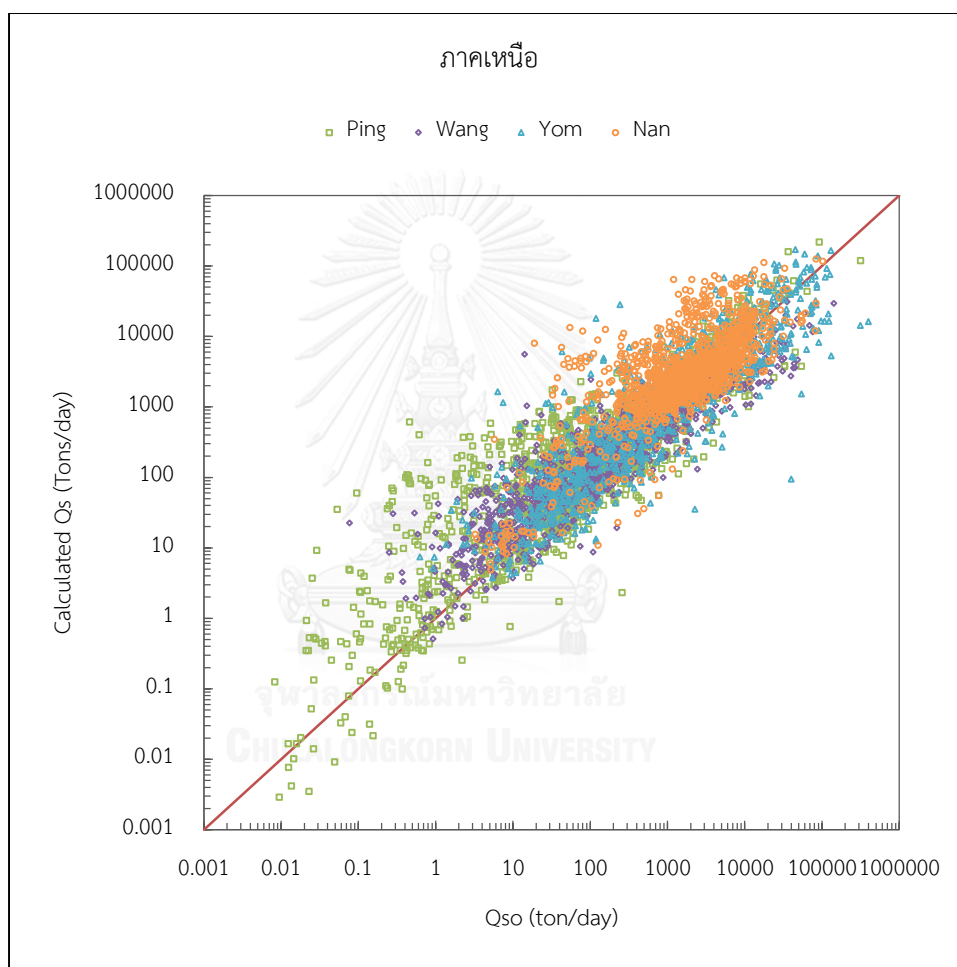
รูปที่ 5-40 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จากวิธีเชิงศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน
พิจารณารายพื้นที่ลุ่มน้ำ

วิเคราะห์ความสัมพันธ์รายภูมิภาค ด้วยข้อมูลของทั้ง 4 กลุ่มน้ำ ได้สมการความสัมพันธ์ของ อัตราการไหลของน้ำ (Q) กับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Qsw) ดังรูปที่ 5-41 โดย ได้แสดงจุดความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ ที่ได้จากการสำรวจข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537) และจุดความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ ที่ได้จากการสำรวจข้อมูลแม่น้ำวังและแม่น้ำ ยม โดย Bidorn et al. (2015) ไว้ในรูปด้วย จะเห็นว่า จุดดังกล่าวมีแนวโน้มในทางเดียวกันกับสมการ ความสัมพันธ์ที่หามาได้



รูปที่ 5-41 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Qsw) ของพื้นที่ภาคเหนือ

เปรียบเทียบผลการสำรวจตะกอนแขวนลอยโดยกรมชลประทาน (Q_{so}) กับ ผลรวมอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (Q_{st}) พิจารณารายพื้นที่ภาค แสดงผลดังรูปที่ 5-42 จากรูปจะเห็นว่า วิธีนี้ให้ผลการประเมินที่สูงเกินจริงในช่วงที่ลำน้ำมีอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยต่ำ ๆ (<100 ตัน/วัน) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นชุดข้อมูลของแม่น้ำปิง และชุดข้อมูลของแม่น้ำน่านจะได้ผลการประเมินค่อนข้างต่ำเกินไปทางที่สูงเกินจริง โดยรวมถือว่าให้ผลการประเมินที่ค่อนข้างดี



รูปที่ 5-42 เปรียบเทียบ Q_{so} กับ Q_{st} จากวิธีเชิงสถิติและอุทกวิทยาาร่วมกัน
พิจารณารายพื้นที่ภาคเหนือ

สรุปค่าความคลาดเคลื่อนของการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม รายลุ่มน้ำ และรายภาค ได้ดังตารางที่ 5-8 และคำนวณความคลาดเคลื่อนแยกรายสถานี เมื่อวิเคราะห์ด้วยสมการรายพื้นที่ลุ่มน้ำ และรายพื้นที่ภาค แสดงผลดังตารางที่ 5-9

ตารางที่ 5-8 ค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณโดยวิธีเชิงลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน ของการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด รอยลุ่มน้ำ และรายภาค

	ลุ่มน้ำ	%SSE	R ²
รายพื้นที่ลุ่มน้ำ	ปัง	68.1	0.435
	วัง	36.8	0.643
	ยม	73.9	0.274
	น่าน	170.6	0.200
รายพื้นที่ภาค	ภาคเหนือ	81.6	0.264

ตารางที่ 5-9 ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี ที่คำนวณโดยวิธีเชิงลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน

สถานี	รายพื้นที่ลุ่มน้ำ			รายพื้นที่ภาคเหนือ		
	%SSE	R ²	\overline{R}_D	%SSE	R ²	\overline{R}_D
P.1	70.4	0.441	1.73	67.5	0.437	1.40
P.4A	75.7	0.710	4.02	80.7	0.639	3.79
P.75	59.7	0.528	9.90	68.3	0.412	9.37
P.77	14.2	0.873	34.14	14.9	0.878	34.00
W.1C	51.1	0.828	2.09	67.5	0.789	2.59
W.3A	28.8	0.699	6.48	52.2	0.629	7.09
W.4A	41.6	0.591	2.01	65.0	0.522	1.92
W.23	36.6	0.696	1.79	69.6	0.680	1.79
Y.1C	66.5	0.461	4.95	75.7	0.393	4.90
Y.6	66.6	0.289	1.59	66.3	0.281	1.39
Y.14	110.4	0.641	3.20	90.0	0.633	3.07
N.7A	37.0	0.539	0.86	29.6	0.532	1.26
N.8A	37.4	0.444	1.22	39.9	0.443	1.55
N.40	448.5	0.461	13.14	471.1	0.464	13.41
N.60	66.3	0.434	2.06	54.5	0.447	3.09
เฉลี่ย	80.7	0.576	5.94	87.5	0.545	6.04

5.4.2. การเปรียบเทียบสัดส่วนตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำจากผลการสำรวจตะกอนแขวนลอยรวม

พิจารณาส่วนต่างของปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (Q_{st}) กับ ปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) เพื่อหาปริมาณตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ (Q_{sb}) โดยใช้สมการเชิงเส้นเป็นตัวแทนของชุดข้อมูลที่นำมาพิจารณา

สร้างสมการความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับผลสำรวจอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยโดยกรมชลประทาน (Q_{so}) เป็นรายพื้นที่ลุ่มน้ำ ได้ดังรูปที่ 5-43 ก, ข) ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราไหลมากกว่า 100 ลบ.ม./วินาที กราฟของลุ่มน้ำปิง วัง และยม ให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องไปในทางเดียวกัน และสามารถใช้สมการเดียวเป็นตัวแทนของทั้ง 3 ลุ่มน้ำได้ ส่วนลุ่มน้ำน่านที่อัตราไหลสูงกว่า 10 ลบ.ม./วินาที จะคำนวณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยได้ต่ำกว่าลุ่มน้ำอื่นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เมื่อย้อนกลับไปดูโค้งปริมาณตะกอนแขวนลอย (sediment discharge rating curve) ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน ในรูปที่ 5-11 พบว่า ความสัมพันธ์ของอัตราไหลที่มีต่อปริมาณตะกอนแขวนลอยก็ไม่ได้สอดคล้องกันได้ดีนัก ประกอบกับผลสำรวจวัสดุท้องน้ำของแม่น้ำน่านยังมีขนาดตะกอนเฉลี่ยที่น้อยกว่าของแม่น้ำอื่น จึงอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ได้เส้นสมการที่ต่างจากลุ่มน้ำอื่นค่อนข้างมาก

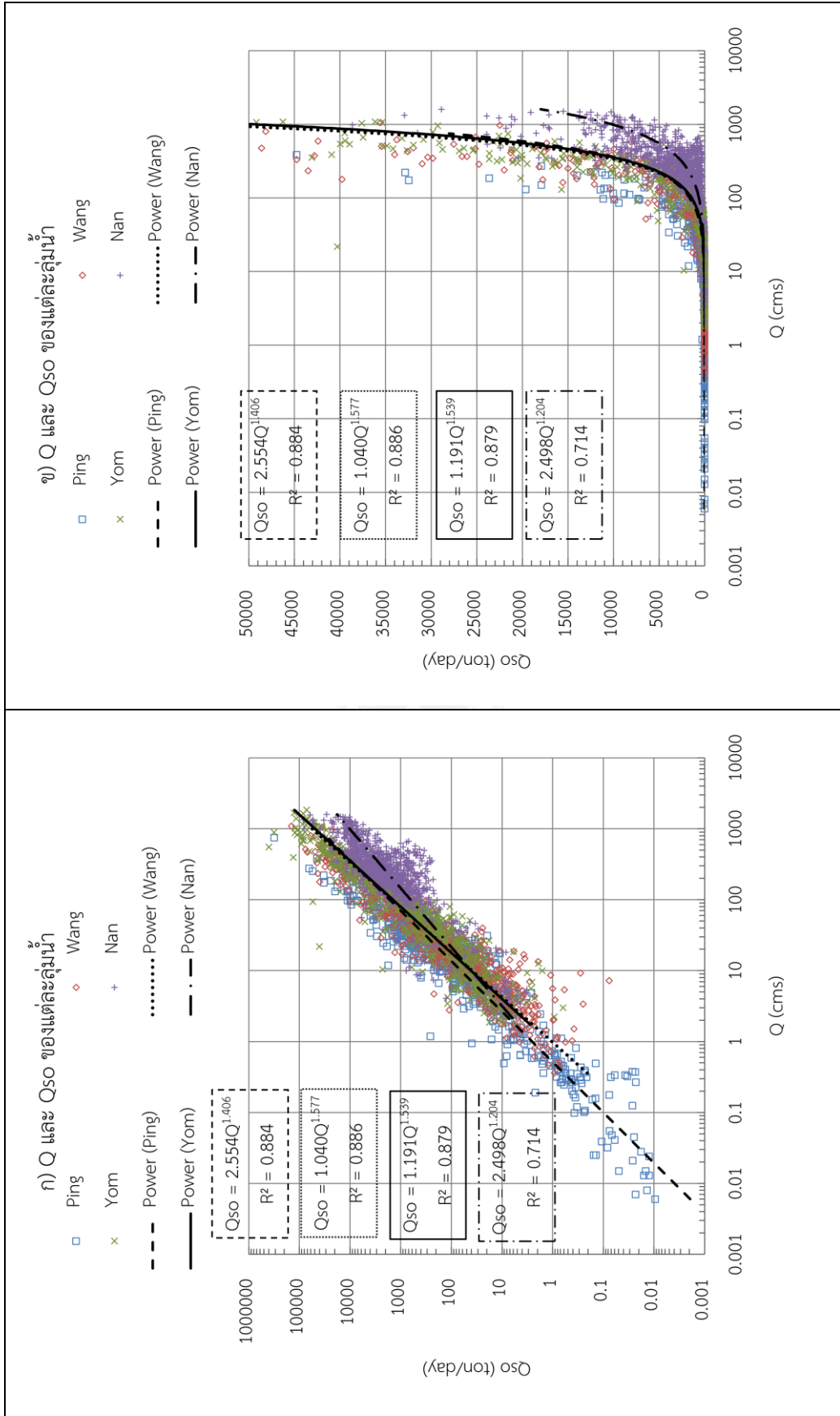
เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำ (Q) กับผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) ของแต่ละลุ่มน้ำ ดังรูปที่ 5-44 ก, ข) พบว่า แม่น้ำน่านยังคงคำนวณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำได้ต่ำกว่าลุ่มน้ำอื่นอย่างเห็นได้ชัด โดยในที่นี้ สมการของลุ่มน้ำวังที่ได้จะแตกต่างจากที่แสดงในรูปที่ 5-37 เล็กน้อย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีสมการเชิงเส้นที่ดีที่สุด ร่วมกับการพิจารณาด้วยประสบการณ์

กล่าวคือ ความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสมการเชิงเส้นที่ดีที่สุด (มีค่า R^2 สูงสุด) อาจไม่แสดงความสัมพันธ์เชิงเหตุผลใน 2 กรณีคือ กรณีที่เส้นกราฟของตะกอนแขวนลอยที่ได้จากสำรวจ (Q_{so}) กับกราฟตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) อาจตัดกันที่ค่าอัตราไหลต่ำ ๆ ทำให้อัตราไหลที่อยู่ต่ำกว่าจุดตัดของกราฟนี้ จะคำนวณค่าตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ (Q_{sb}) ได้ค่าเป็นลบ ซึ่งไม่เป็นจริง และในกรณีที่กราฟทั้งสองเส้นมีลักษณะลู่ออกเข้าหากัน จะพบว่า เมื่ออัตราไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ผลการคำนวณ Q_{sb} จะได้น้อยลง ซึ่งไม่สอดคล้องกับหลักกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ว่า ที่อัตราไหลสูง ๆ จะมีแรงมากกระทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำได้มากขึ้น จึงมีวัสดุท้องน้ำส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ไปเป็นตะกอนแขวนลอยได้เพิ่มขึ้นด้วย

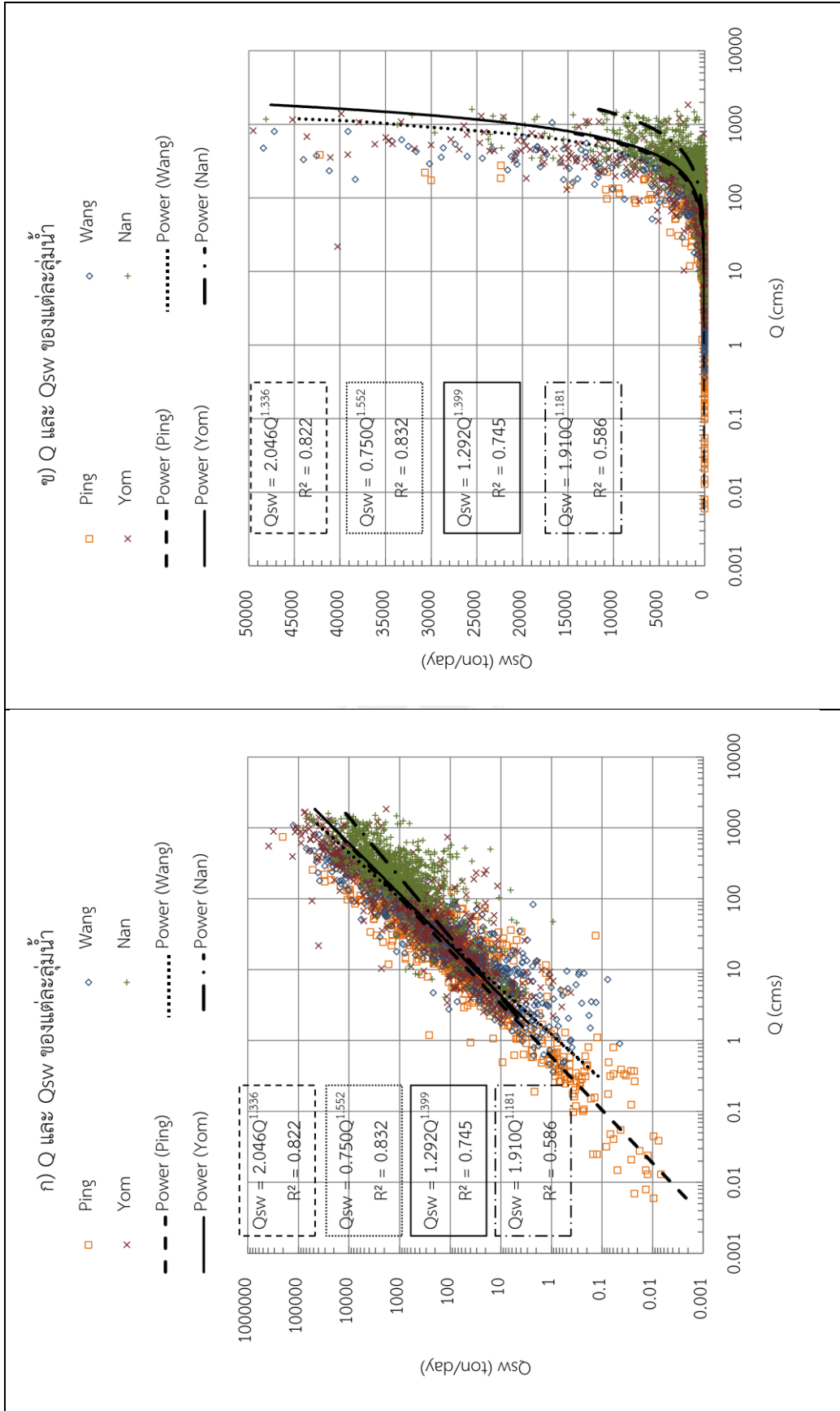
เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยที่สำรวจได้ (Q_{so}) กับตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) แยกตามรายลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่าน และพิจารณารายพื้นที่ภาคเหนือ แสดงผลได้ดัง

รูปที่ 5-45, รูปที่ 5-46, รูปที่ 5-47, รูปที่ 5-48 และ รูปที่ 5-49 ตามลำดับ พบว่า ทั้งลุ่มน้ำปิง ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม และลุ่มน้ำน่าน ต่างมีเส้นความสัมพันธ์ของผลการสำรวจจริงอยู่เหนือเส้นความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยส่วนที่ไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำ แสดงว่า ส่วนหนึ่งของตะกอนแขวนลอยที่สำรวจจริงมีตะกอนที่มาจากวัสดุท้องน้ำรวมอยู่ ซึ่งเป็นค่าส่วนต่างระหว่างเส้นทั้งสองเส้น โดยที่อัตราการไหลของน้ำต่ำ ๆ แทบจะไม่มีตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำเลย และ เมื่ออัตราไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำก็จะมามากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของตะกอน

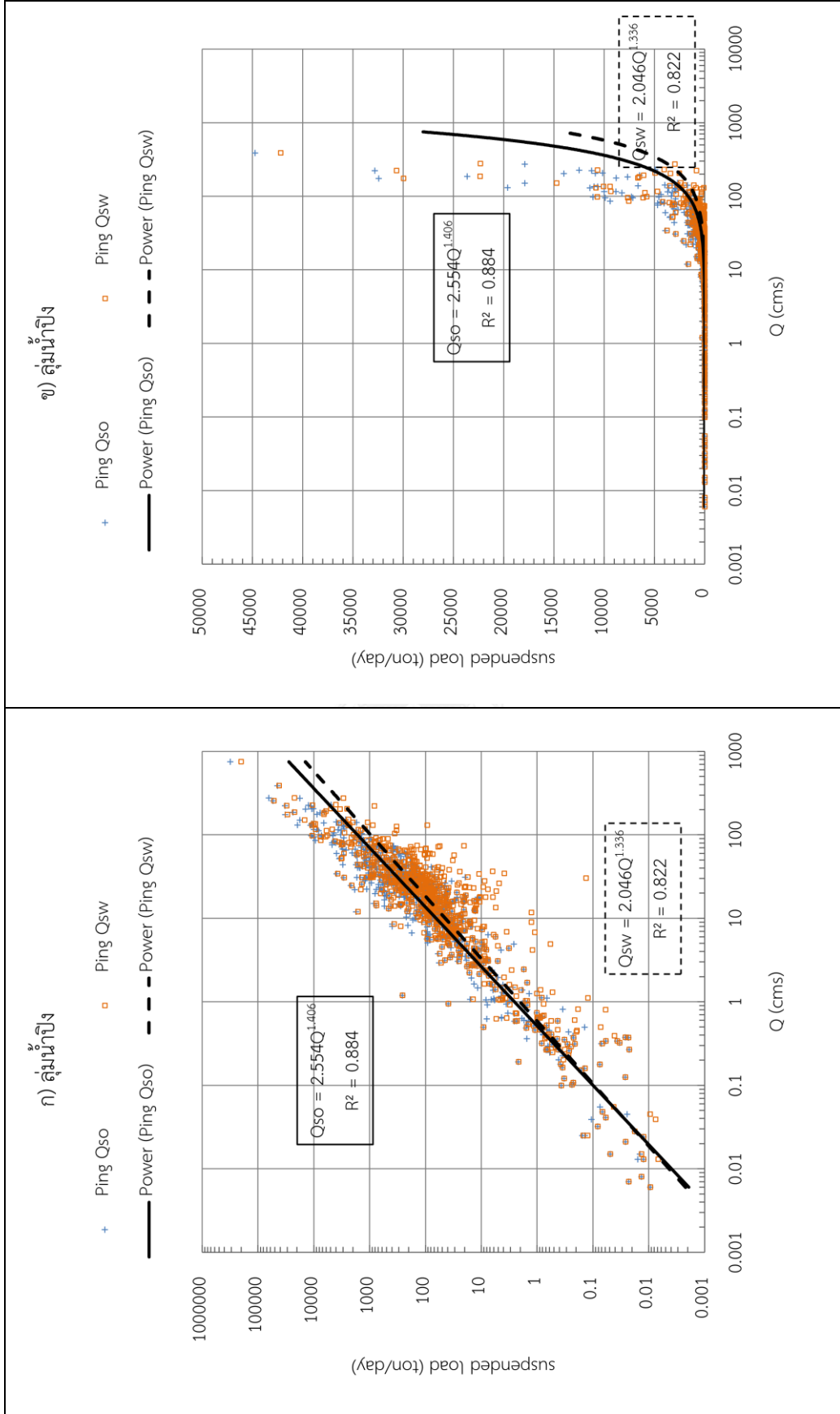




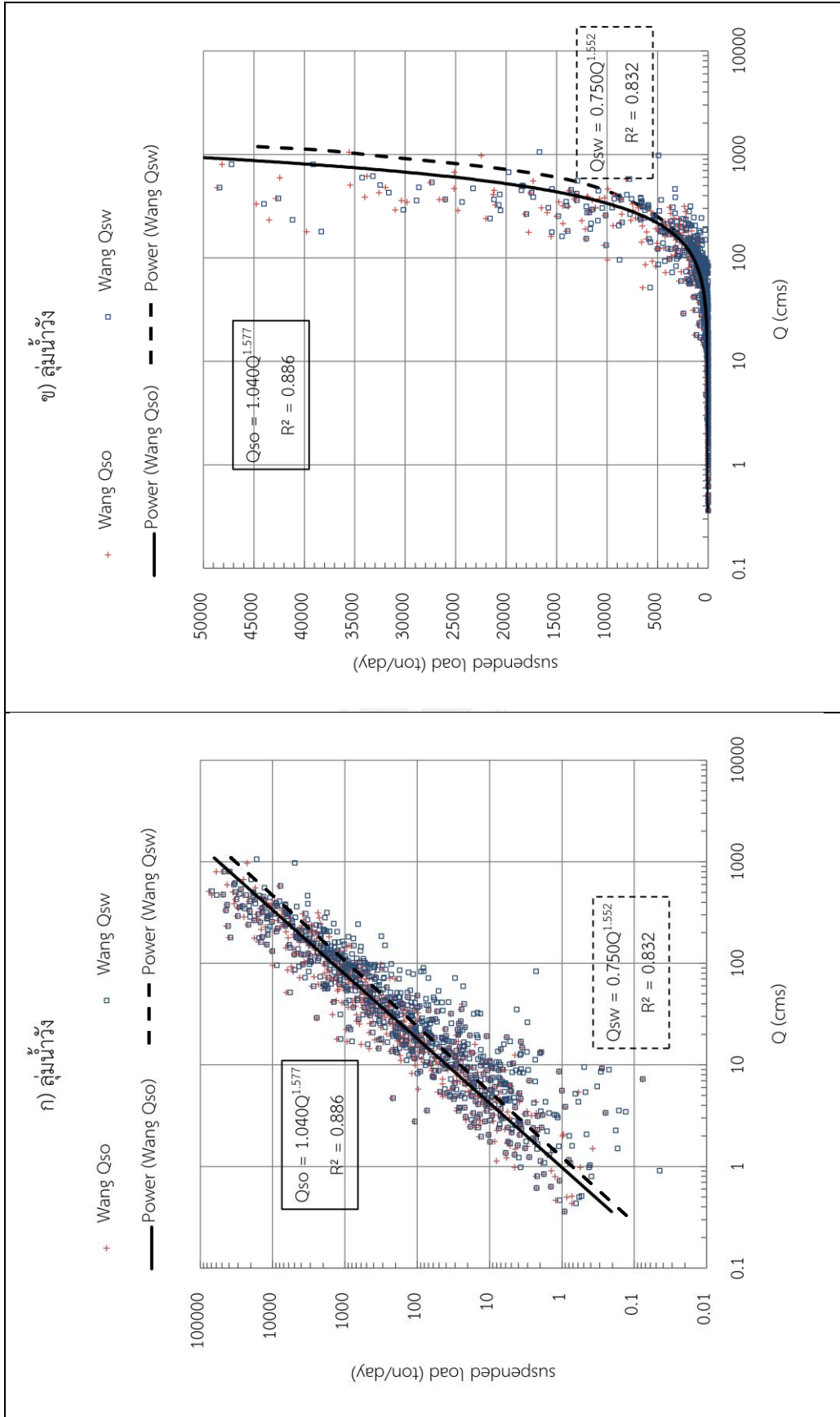
รูปที่ 5-43 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราไหล (Q) กับผลการสำรวจปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (Qso) ของแต่ละลุ่มน้ำ



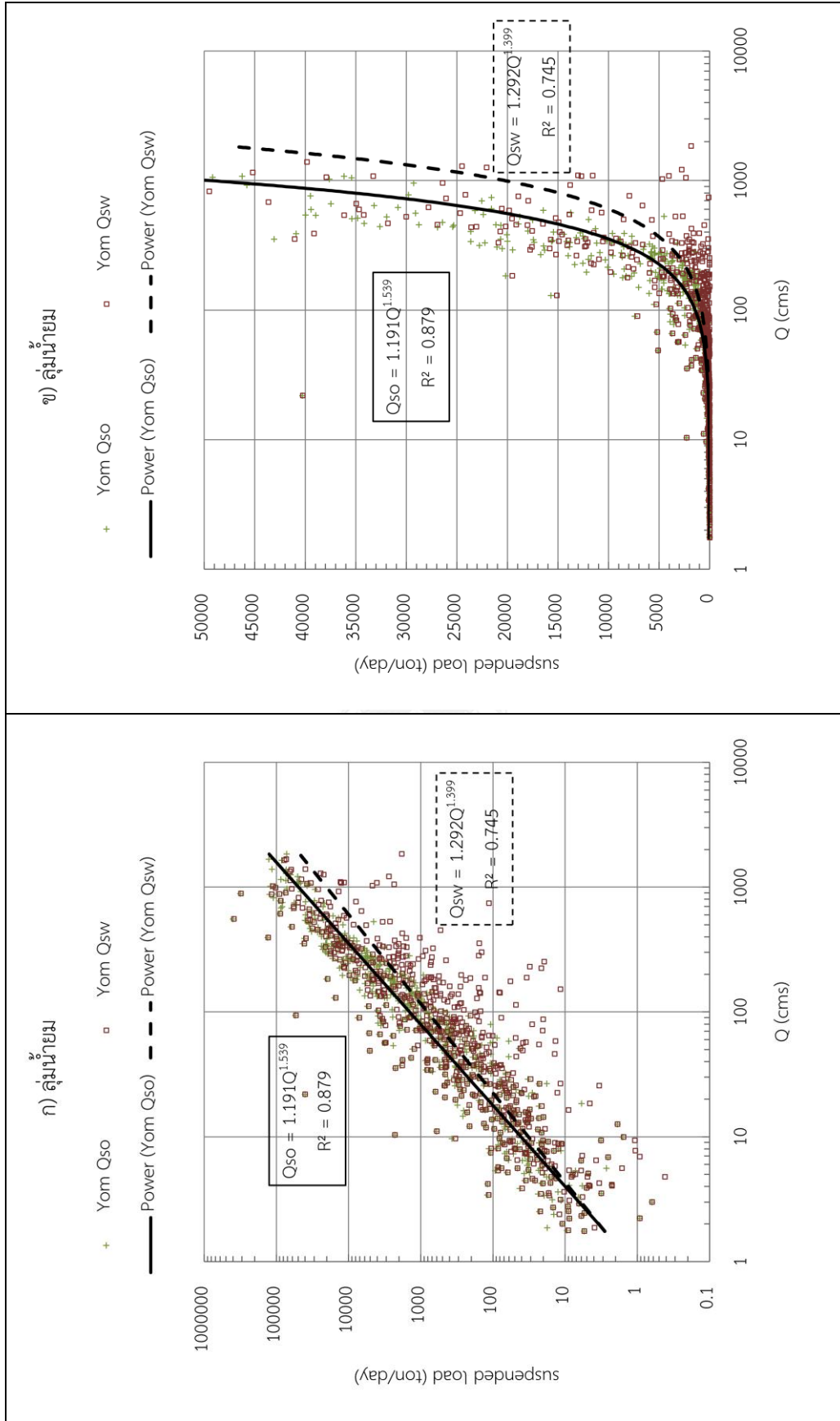
รูปที่ 5-44 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราไหล (Q) กับ ค่าประเมินปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (Q_{sw}) ของแต่ละลุ่มน้ำ



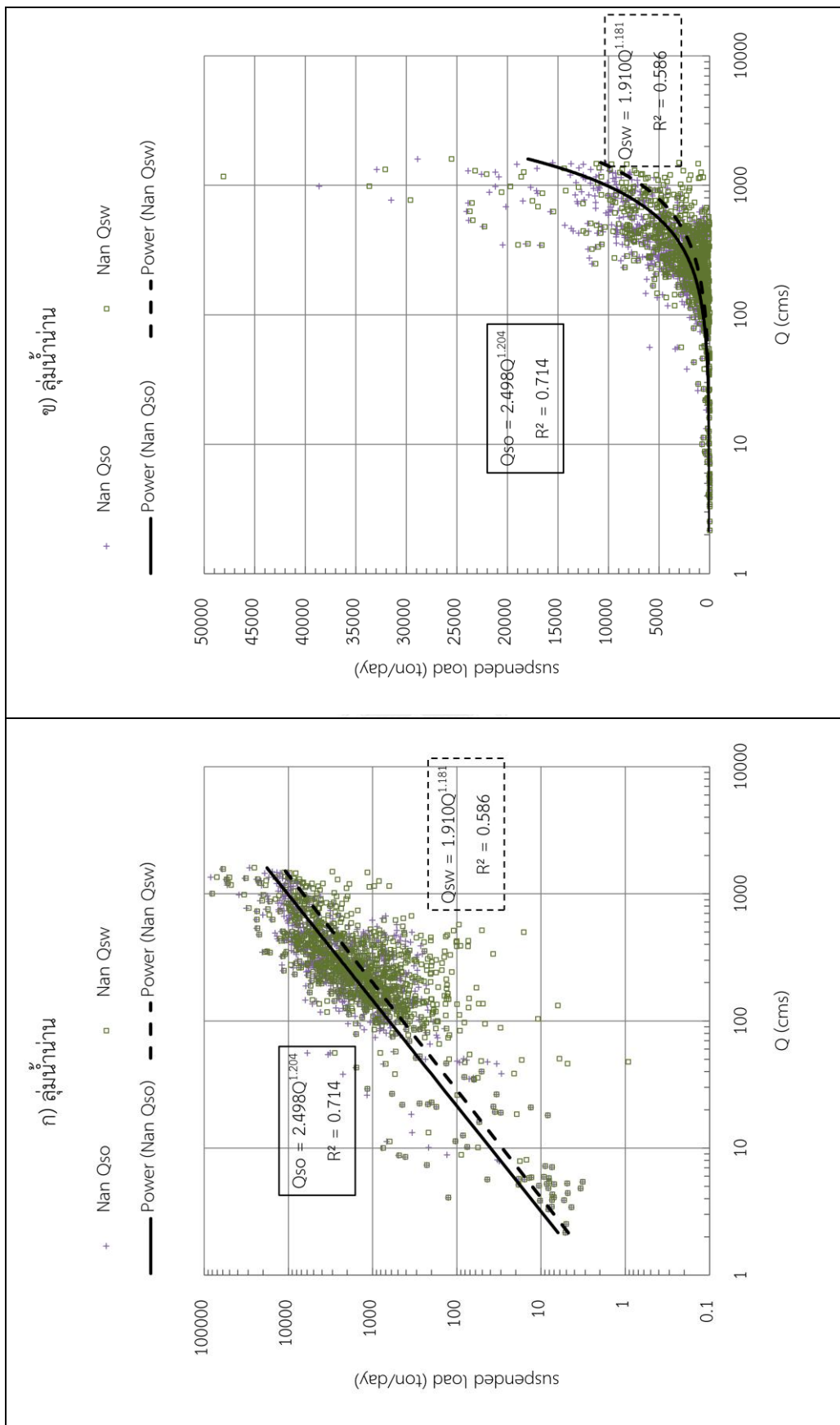
รูปที่ 5-45 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างอัตราการไหล (Q) กับ Q_{SO} และ Q_{SW} ของลุ่มน้ำปิง



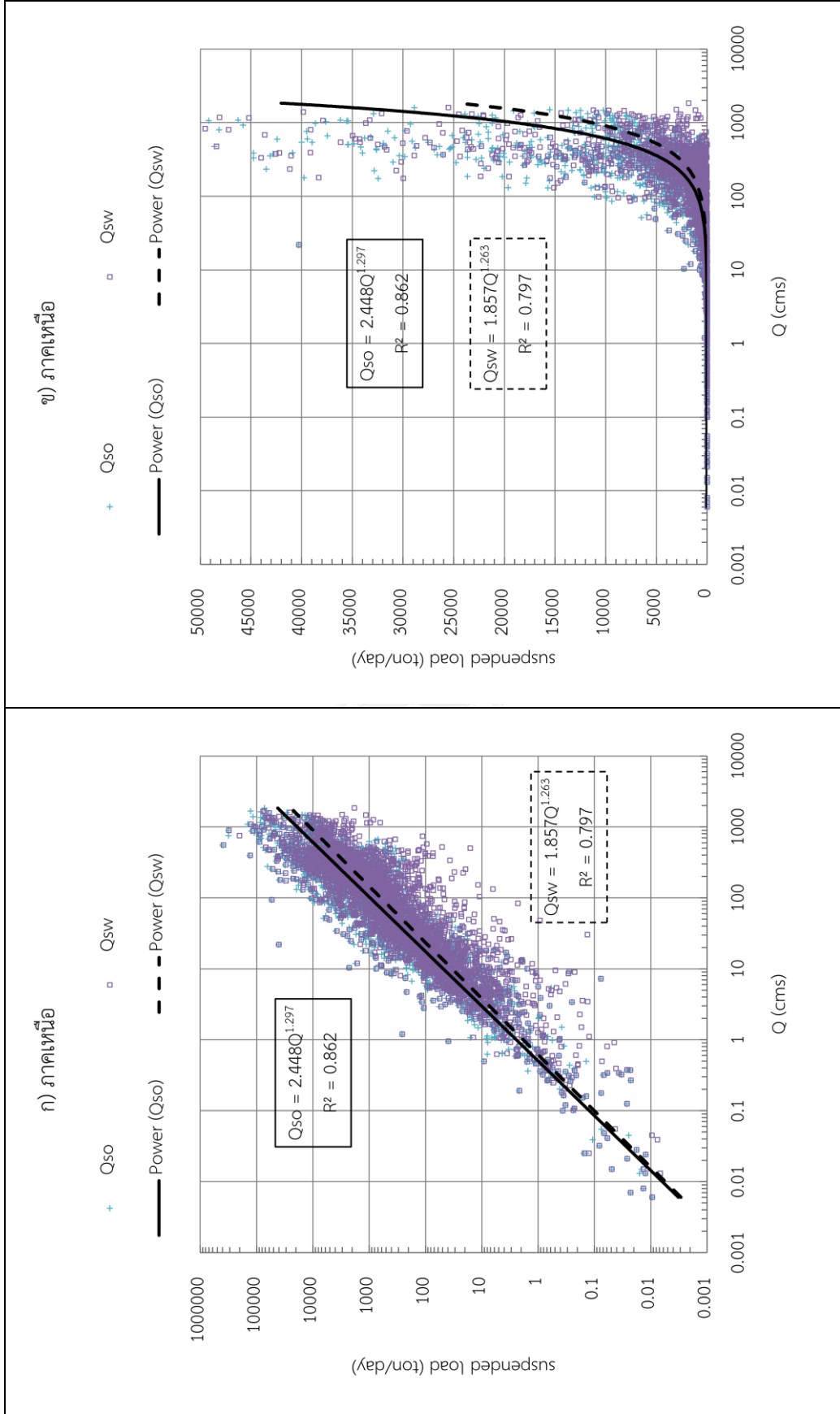
รูปที่ 5-46 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างอัตราไหล (Q) กับ Q_{so} และ Q_{sw} ของลุ่มน้ำวัง



รูปที่ 5-47 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ไดระหว่างอัตราไหล (Q) กับ Q_{so} และ Q_{sw} ของลุ่มน้ำยม

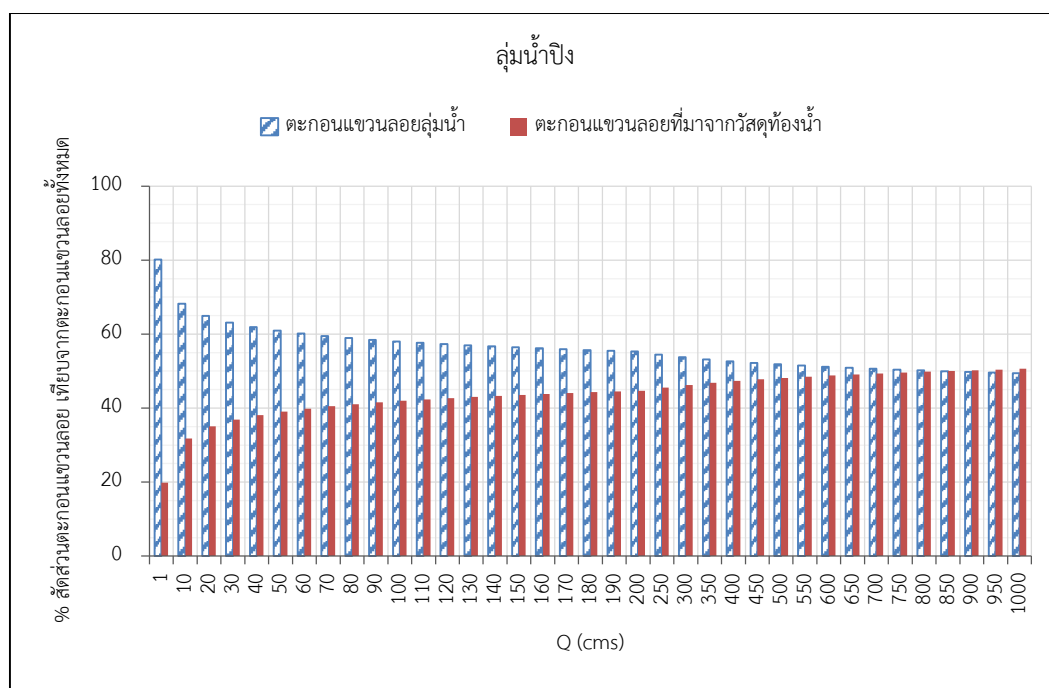


รูปที่ 5-48 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างอัตราไหล (Q) กับ Qso และ Qsw ของกลุ่มน้ำน่าน

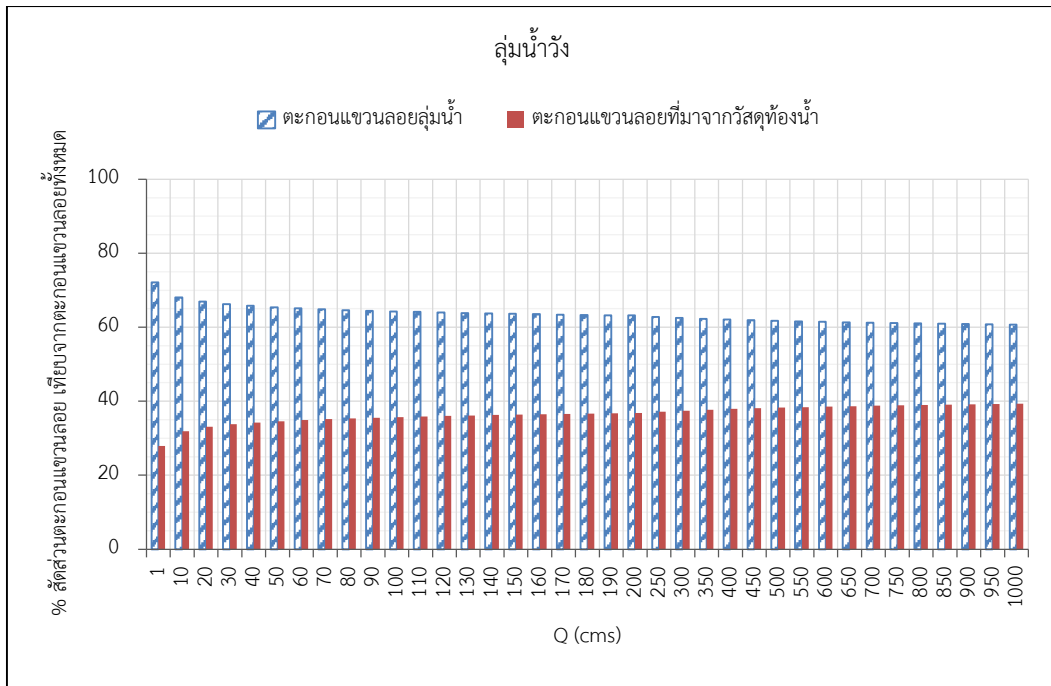


รูปที่ 5-49 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างอัตราไหล (Q) กับ Qso และ Qsw ของลุ่มน้ำภาคเหนือ

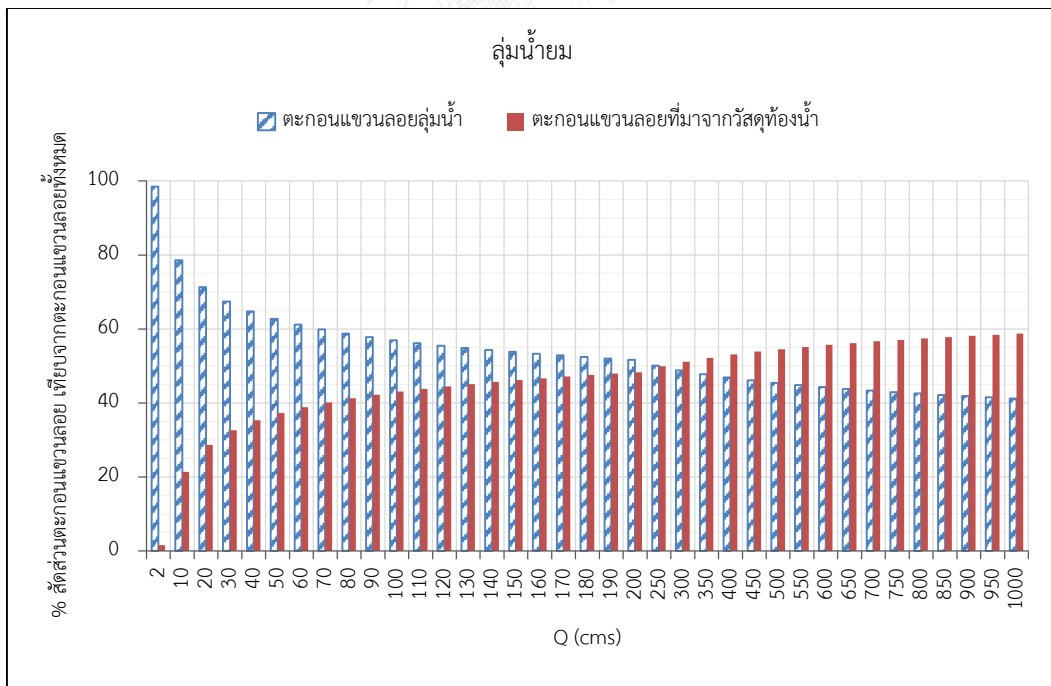
คำนวณค่า Q_{so} และ Q_{sw} ด้วยสมการรายลุ่มน้ำ และสมการรายภาค ที่แสดงไว้ในรูปที่ 5-45 ถึงรูปที่ 5-49 โดยเลือกใช้ค่า Q ต่าง ๆ มาคำนวณ เพื่อนำมาหาค่าสัดส่วนร้อยละของปริมาณตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ ($\%Q_{sb}/Q_{st}$) และสัดส่วนร้อยละของปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ ($\%Q_{sw}/Q_{st}$) เทียบกับปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม ของลุ่มน้ำปิง วัง ยม น่าน และรวม 4 ลุ่มน้ำภาคเหนือ แสดงผลดังรูปที่ 5-50 ถึงรูปที่ 5-54



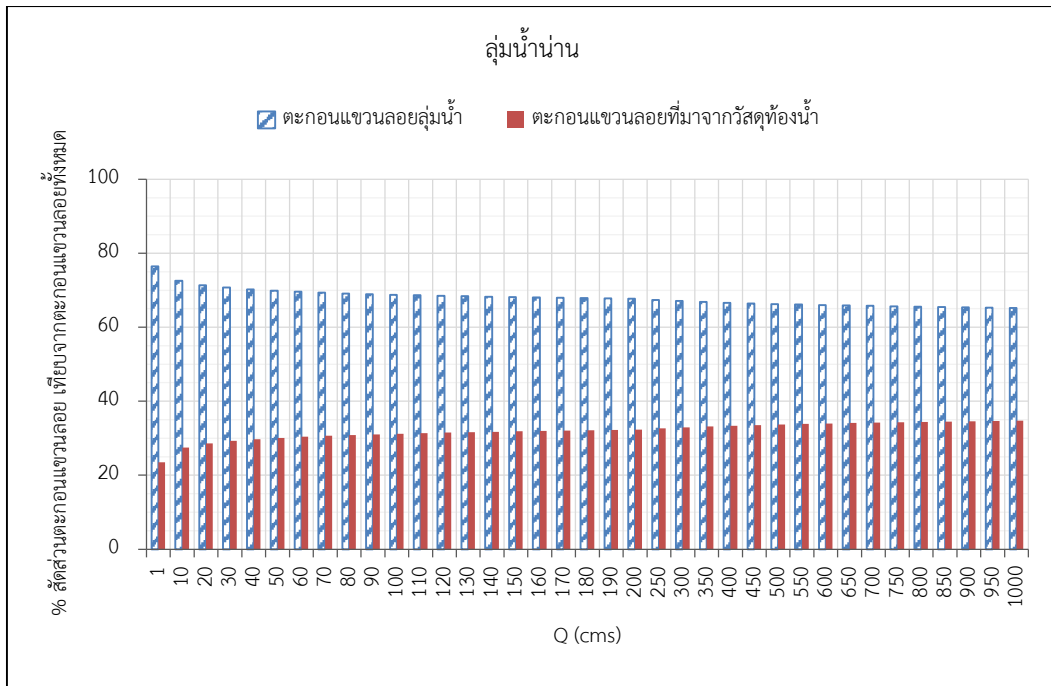
รูปที่ 5-50 ประมาณค่า $\%Q_{sb}/Q_{st}$ และ $\%Q_{sw}/Q_{st}$ ของลุ่มน้ำปิง



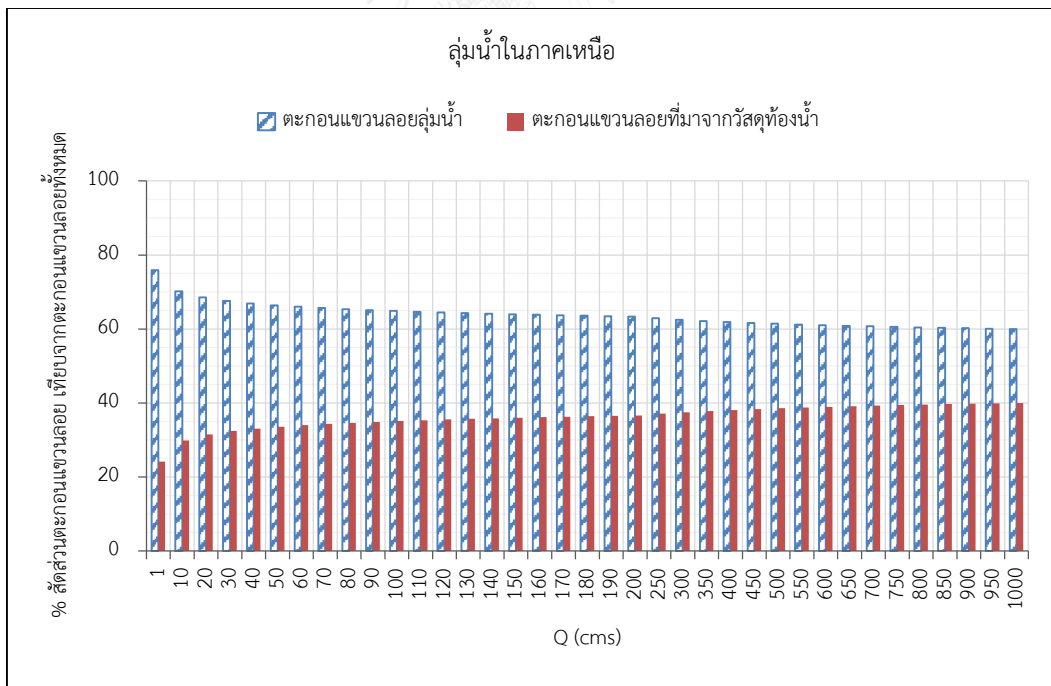
รูปที่ 5-51 ประมาณค่า %Qsb/Qst และ %Qsw/Qst ของลุ่มน้ำวัง



รูปที่ 5-52 ประมาณค่า %Qsb/Qst และ %Qsw/Qst ของลุ่มน้ำยม



รูปที่ 5-53 ประมาณค่า % Q_{sb}/Q_{st} และ % Q_{sw}/Q_{st} ของลุ่มน้ำน่าน



รูปที่ 5-54 ประมาณค่า % Q_{sb}/Q_{st} และ % Q_{sw}/Q_{st} ของลุ่มน้ำในภาคเหนือ

แบ่งอัตราไหลของน้ำเป็น 3 ช่วง คือ ช่วง Q น้อย (1-100 cms) ช่วง Q กลาง (100-400 cms) และช่วง Q มาก (400-1000 cms) สรุปสัดส่วนร้อยละของปริมาณตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ (%Qsb/Qst) และร้อยละของปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ (%Qsw/Qst) ได้ดังตารางที่ 5-10

ตารางที่ 5-10 ประมาณค่า %Qsb/Qst และ %Qsw/Qst ที่ช่วงอัตราไหลต่าง ๆ

ลุ่มน้ำ	%Qsb/Qst			%Qsw/Qst		
	ช่วง Q น้อย	ช่วง Q กลาง	ช่วง Q มาก	ช่วง Q น้อย	ช่วง Q กลาง	ช่วง Q มาก
ปึง	20-42	42-47	47-51	80-58	58-53	53-49
วัง	28-36	36-38	38-39	72-64	64-62	62-61
ยม	0-43	43-53	53-59	100-57	57-47	47-41
น่าน	24-31	31-33	33-35	76-69	69-67	67-65
ภาคเหนือ	24-35	35-38	38-40	76-65	65-62	62-60

ลุ่มน้ำภาคเหนือ มีสัดส่วนของปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำประมาณร้อยละ 60 ของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด และมีสัดส่วนของตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำคิดเป็นร้อยละ 40 ของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด เมื่อพิจารณารายลุ่มน้ำพบว่า ลุ่มน้ำปึงมีสัดส่วนร้อยละของปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำเป็นช่วงกว้าง (49-53%) ในขณะที่ลุ่มน้ำน่าน มีช่วงสัดส่วนร้อยละของปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำที่ไม่กว้างมากนัก (65-67%) ความต่างของช่วงร้อยละนี้เกี่ยวข้องกับลักษณะทางอุทกวิทยา และปัจจัยที่ทำให้เกิดการชะล้างพังทลายของดินในแต่ละลุ่มน้ำนั้น

พิจารณาค่าอัตราไหลเฉลี่ยของแต่ละลุ่มน้ำ สามารถประเมินสัดส่วนร้อยละของปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ และที่มาจากวัสดุท้องน้ำ ได้ดังตารางที่ 5-11 พบว่าแม่น้ำวัง มีอัตราไหลเฉลี่ยต่ำสุดใน 4 ลุ่มน้ำ ในขณะที่แม่น้ำน่านมีอัตราไหลเฉลี่ยสูงกว่าลุ่มน้ำอื่น แต่ทั้ง 2 ลุ่มน้ำก็มีสัดส่วนปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำที่ใกล้เคียงกัน ส่วนแม่น้ำปึงซึ่งมีอัตราไหลเฉลี่ยสูงกว่าแม่น้ำยมเกือบ 2 เท่า ก็พบสัดส่วนปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำที่ใกล้เคียงกับของแม่น้ำยม

ตารางที่ 5-11 ประมาณค่า $\%Qsb/Qst$ และ $\%Qsw/Qst$ ที่ค่าอัตราไหลเฉลี่ยของแต่ละลุ่มน้ำ

ลุ่มน้ำ	ปริมาณน้ำท่ารายปี	อัตราไหลเฉลี่ย	สมการรายลุ่มน้ำ			สมการภาคเหนือ		
	ล้าน ลบ.ม.	ลบ.ม./วินาที	$\%Qs$ non bed	$\%Qs$ bed	Ratio non bed/bed	$\%Qs$ non bed	$\%Qs$ bed	Ratio non bed/bed
ปิง	9299 ^a	290	54	46	1.2	63	37	1.7
วัง	1803 ^b	60	65	35	1.9	66	34	1.9
ยม	4926 ^c	160	53	47	1.1	64	36	1.8
น่าน	11955 ^d	380	67	33	2.0	62	38	1.6

^a สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555b

^b สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555d

^c สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555c

^d สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555a

5.5. เปรียบเทียบผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม โดยวิธีต่าง ๆ

5.5.1. เปรียบเทียบด้วยเกณฑ์วัดความถูกต้องของสมการ

เปรียบเทียบ 4 วิธีการที่ใช้แนวคิดเชิงชลศาสตร์มาคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม โดยตรวจสอบกับค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่สำรวจโดยกรมชลประทาน แสดงตารางเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน แยกเป็น 6 แบบ ได้แก่ การพิจารณารายสถานี ด้วยวิธีลอเรนเซน (Laursen method) และวิธีดัดแปลงโค้งของลอเรนเซน (modified Laursen curve) การพิจารณารายพื้นที่ลุ่มน้ำและรายพื้นที่ภาค ด้วยวิธีลอเรนเซนดัดแปลงโดยแมดเดน (Madden's modification of Laursen method) และวิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts)

เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากชุดข้อมูลของแต่ละสถานี แยกตามประเภทของเกณฑ์วัดความถูกต้องของสมการ คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (%SSE) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) และ ค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ($\overline{R_D}$) แสดงดังตารางที่ 5-12 ตารางที่ 5-13 และตารางที่ 5-14 ตามลำดับ

ทั้งนี้ เกณฑ์ทดสอบความถูกต้องของสมการ ในรูปของความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้ ทั้งค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (%SSE) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) และ ค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ($\overline{R_D}$) ไม่ได้แสดงผลการวัดความคลาดเคลื่อนทางสถิติไปในทางเดียวกันในแต่ละทุกสถานี กล่าวคือ บางสถานีที่ได้ค่า %SSE ต่ำ R^2 สูง แต่กลับมี $\overline{R_D}$ ที่ไม่ใกล้เคียง 1 เลย หรือ

บางสถานีที่มีค่า $\overline{R_D}$ ใกล้เคียง 1 แต่ได้ค่า %SSE สูงและ R^2 ต่ำ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ค่าการวัดความคลาดเคลื่อนทางสถิติอย่างเดียวไม่สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความถูกต้องของวิธีการที่ใช้ในการอธิบายข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนแขวนลอยที่ได้จากการวัดโดยสิ้นเชิง ต้องพิจารณาจากตัวชี้วัดอื่น ๆ ที่เหมาะสมด้วย

ตารางที่ 5-12 เปรียบเทียบค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน ของผลการสำรวจ กับ ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนโดยวิธีต่างๆ

สถานี	ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (%SSE)					
	วิธีลอเรน (Laursen method)	วิธีดัดแปลงโค้งของลอเรน (modified Laursen curve)	วิธีลอเรนดัดแปลงโดยแมคเคน (Madden's modification of Laursen method)		วิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts)	
			รายพื้นที่ลุ่มน้ำ	รายพื้นที่ภาคเหนือ	รายพื้นที่ลุ่มน้ำ	รายพื้นที่ภาคเหนือ
P.1	64.4	2775.6	57.9	56.0	70.4	67.5
P.4A	88.9	114.6	94.6	93.1	75.7	80.7
P.75	82.9	1596.1	73.8	70.0	59.7	68.3
P.77	16.7	5638.9	81.8	77.0	14.2	14.9
W.1C	78.7	41.8	77.7	82.4	51.1	67.5
W.3A	69.9	1258.2	89.3	84.2	28.8	52.2
W.4A	88.5	243.9	39.2	64.9	41.6	65.0
W.23	98.0	87.1	68.2	89.0	36.6	69.6
Y.1C	90.7	116.4	83.7	82.9	66.5	75.7
Y.6	69.3	567.4	75.9	73.7	66.6	66.3
Y.14	68.1	4012.9	33.5	36.2	110.4	90.0
N.7A	82.1	161.2	42.8	35.4	37.0	29.6
N.8A	60.2	858.1	41.4	66.0	37.4	39.9
N.40	411.1	5540.1	278.1	643.9	448.5	471.1
N.60	96.0	59.1	87.3	88.0	66.3	54.5
เฉลี่ย	97.7	1538.1	81.7	109.5	80.7	87.5

ตารางที่ 5-13 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ของผลการสำรวจ กับ ผลการประเมิน
อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนโดยวิธีต่างๆ

สถานี	สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2)					
	วิธีลอเรน (Laursen method)	วิธีดัดแปลง โค้งของ ลอเรน (modified Laursen curve)	วิธีลอเรน ดัดแปลงโดยแมดเดน (Madden's modification of Laursen method)		วิธีเชิงชลศาสตร์และ อุทกวิทยาร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts)	
			รายพื้นที่ ลุ่มน้ำ	รายพื้นที่ ภาคเหนือ	รายพื้นที่ ลุ่มน้ำ	รายพื้นที่ ภาคเหนือ
P.1	0.432	0.438	0.441	0.441	0.441	0.437
P.4A	0.443	0.447	0.885	0.858	0.710	0.639
P.75	0.167	0.179	0.588	0.580	0.528	0.412
P.77	0.882	0.860	0.621	0.648	0.873	0.878
W.1C	0.762	0.756	0.755	0.774	0.828	0.789
W.3A	0.517	0.518	0.711	0.694	0.699	0.629
W.4A	0.238	0.248	0.606	0.516	0.591	0.522
W.23	0.046	0.044	0.687	0.553	0.696	0.680
Y.1C	0.120	0.155	0.541	0.532	0.461	0.393
Y.6	0.262	0.263	0.313	0.310	0.289	0.281
Y.14	0.620	0.621	0.652	0.653	0.641	0.633
N.7A	0.530	0.529	0.543	0.553	0.539	0.532
N.8A	0.397	0.396	0.422	0.444	0.444	0.443
N.40	0.457	0.447	0.456	0.449	0.461	0.464
N.60	0.328	0.332	0.372	0.422	0.434	0.447
เฉลี่ย	0.413	0.416	0.573	0.562	0.576	0.545

ตารางที่ 5-14 เปรียบเทียบค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ของผลการสำรวจ กับ ผลการประเมิน
อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนโดยวิธีต่างๆ

สถานี	ค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (R_D)					
	วิธีลอเรน (Laursen method)	วิธีดัดแปลง โค้งของ ลอเรน (modified Laursen curve)	วิธีลอเรน ดัดแปลงโดยแมดเดน (Madden's modification of Laursen method)		วิธีเชิงชลศาสตร์และ อุทกวิทยาาร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts)	
			รายพื้นที่ ลุ่มน้ำ	รายพื้นที่ ภาคเหนือ	รายพื้นที่ ลุ่มน้ำ	รายพื้นที่ ภาคเหนือ
P.1	0.57	4.03	2.24	2.54	1.73	1.40
P.4A	2.08	37.09	0.42	0.62	4.02	3.79
P.75	7.82	141.03	4.73	5.77	9.90	9.37
P.77	32.66	566.17	3.44	5.11	34.14	34.00
W.1C	0.87	12.51	3.39	1.75	2.09	2.59
W.3A	3.15	54.96	0.51	0.41	6.48	7.09
W.4A	1.08	19.13	2.72	1.67	2.01	1.92
W.23	0.70	12.84	0.89	0.65	1.79	1.79
Y.1C	4.10	44.91	1.17	1.51	4.95	4.90
Y.6	0.59	3.90	1.26	1.17	1.59	1.39
Y.14	1.79	12.06	6.08	5.51	3.20	3.07
N.7A	0.11	1.88	0.50	0.70	0.86	1.26
N.8A	0.59	7.08	1.82	2.39	1.22	1.55
N.40	12.21	41.01	14.03	22.93	13.14	13.41
N.60	0.20	3.43	0.60	0.53	2.06	3.09
เฉลี่ย	4.57	64.14	2.92	3.55	5.94	6.04

5.5.2. ผลการคัดเลือกวิธีคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม

จากผลการประเมินปริมาณตะกอนรวมจากทั้ง 5 วิธีที่ศึกษา สรุปได้ว่า วิธีการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่เหมาะสมกับแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย คือ วิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts) เนื่องจากเป็นวิธีที่อธิบายอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนที่เกิดขึ้นได้ด้วยหลักกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของตะกอน และให้ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่ดี ของทั้ง 15 สถานี แสดงสมการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณตะกอนรวม} &= \text{ปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ} + \text{ปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ} \\ (Qt) &= (Qbt) + (Qsw) \end{aligned}$$

$$\text{Total load (ton/day)} = \frac{86400}{100} \cdot Q_{(cms)} \left[\sum p \left(\frac{d}{y} \right)^{\frac{7}{6}} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1 \right) f \left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega} \right)_{total} \right] + 1.857 Q_{(cms)}^{1.263} \quad (5.1)$$

ทำการทดสอบสมการที่ได้จากวิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน โดยคำนวณปริมาณตะกอนรวม (Qt) ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่านของโพทूरย์ (2537) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการประเมินค่า Qt ที่ได้จากโปรแกรม HEC-6 ของวิธีการประเมิน 10 แบบ ซึ่งโพทूरย์ (2537) ได้ศึกษาไว้ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของผลรวมความแตกต่างกำลังสอง (sum of the square of difference, SSD) เป็นค่าเปรียบเทียบ แสดงผลดังตารางที่ 5-15 เมื่อพิจารณาด้วยลำดับชุดข้อมูลที่ 10-22 และตารางที่ 5-16 เมื่อพิจารณาด้วยลำดับชุดข้อมูลที่ 12-22 โดยไม่พิจารณาชุดข้อมูลที่ 10 และ 11 ซึ่งมีผลสำรวจปริมาณตะกอนรวมที่สูงกว่าชุดข้อมูลอื่น

สมการคำนวณผลรวมความแตกต่างกำลังสอง (SSD) หาได้จากสมการ

$$SSD = \sqrt{\sum (Q_{measured} - Q_{computed})^2} \quad (5.2)$$

ผลการทดสอบ พบว่า วิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน ด้วยสมการภาคเหนือ ในตารางที่ 5-15 ได้ค่า SSD สูงถึง 10,770 ตัน/วัน ซึ่งสูงกว่าวิธีอื่น ๆ เนื่องจากมีผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของชุดข้อมูลที่ 10 และ 11 ที่ต่ำกว่าค่าการสำรวจจริงเกือบ 3 เท่า ส่วนตารางที่ 5-16 ได้ค่า SSD คิดเป็น 1,519 ตัน/วัน ถือได้ว่า วิธีนี้มีความเหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในประเทศไทยได้

ตารางที่ 5-15 ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมโดยวิธีต่าง ๆ ของลำดับชุดข้อมูล 10-22 ของไพทอร์ย (2537)

ลำดับชุดข้อมูล	ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมโดยวิธีต่าง ๆ												
	ผลสำรวจอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนรวมของไพทอร์ย (2537) (ตัน/วัน)	1. Toffaleti Method (1969)	3. Madden (1963) modification of Laursen's (1958)	4. Yang Streampower (1973)	5. Duboy (Brown, 1950)	7. Ackers-White (1973)	8. Colby (1964)	9. Toffaleti and Schoklitsch	10. Meyer-Peter Muler (1948)	12. Toffaleti (1969) – Meyer-Peter Muller (1948)	13. Madden (1985) modification of Laursen (1958)	วิธีเชิงสถิติและอุทกวิทยาร่วมกัน ด้วยสมการภาคเหนือ	วิธีเชิงสถิติและอุทกวิทยาร่วมกัน ด้วยสมการสมูทนิ่ง
10	13245	12890	12928	13360	21010	14053	15299	13049	11266	12891	13079	4921	3229
11	11011	10555	10662	10372	14356	11427	12893	10615	9523	10958	10792	4348	2819
12	465	350	342	342	338	340	412	350	338	350	346	1016	695
13	856	736	713	714	703	715	920	736	703	736	720	1382	927
14	735	727	705	707	698	706	854	727	716	734	710	1396	936
15	715	711	680	684	674	684	921	711	674	711	684	1355	910
16	732	700	674	672	667	670	840	700	667	700	680	1391	933
17	3508	6321	6186	6581	11270	6830	7278	6414	5609	6635	6321	3528	2343
18	3320	4793	4723	4744	8984	5153	5378	4845	4146	5077	4871	3069	2044
19	2688	4230	4301	4338	8375	4598	4786	4299	3637	4531	4429	2912	1958
20	3477	4841	4817	5093	10778	5472	5681	4937	3849	4844	4948	2997	1978
21	2416	3931	3937	4101	9118	4462	4462	4002	3030	3931	4052	2732	1826
22	2716	3849	3857	3677	6361	4185	4431	3876	3280	4079	3987	2756	1837
SSD = (ตัน/วัน)		4273	4173	4586	17542	5407	6532	4425	3607	4737	4463	10770	13210

ตารางที่ 5-16 ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมโดยวิธีต่าง ๆ ของลำดับชุดข้อมูล 12-22 ของไพทอร์ย (2537)

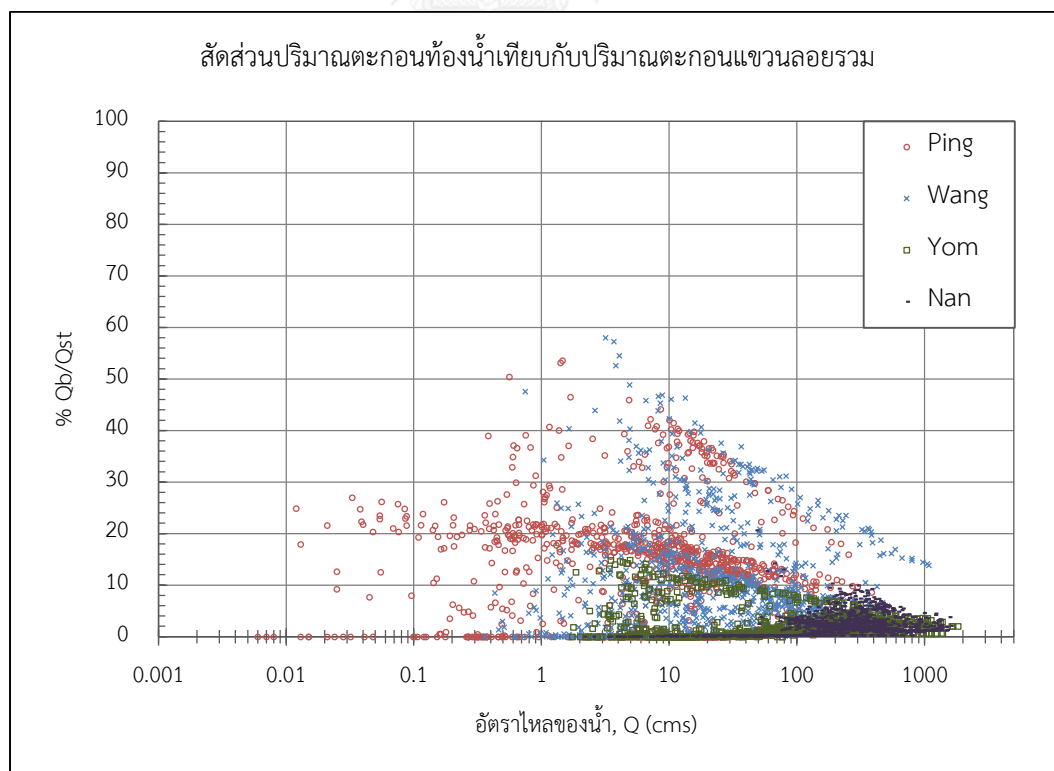
ลำดับชุดข้อมูล	ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมโดยวิธีต่าง ๆ												
	ผลสำรวจอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนรวมของไพทอร์ย (2537) (ตัน/วัน)	1. Toffaleti Method (1969)	3. Madden (1963) modification of Laursen's (1958)	4. Yang Streampower (1973)	5. Duboy (Brown, 1950)	7. Ackers-White (1973)	8. Colby (1964)	9. Toffaleti and Schoklitsch	10. Meyer-Peter Muler (1948)	12. Toffaleti (1969) – Meyer-Peter Muller (1948)	13. Madden (1985) modification of Laursen (1958)	วิธีเชิงศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน ด้วยสมการภาคเหนือ	วิธีเชิงศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน ด้วยสมการลุ่มน้ำนาน
12	465	350	342	342	338	340	412	350	338	350	346	1016	695
13	856	736	713	714	703	715	920	736	703	736	720	1382	927
14	735	727	705	707	698	706	854	727	716	734	710	1396	936
15	715	711	680	684	674	684	921	711	674	711	684	1355	910
16	732	700	674	672	667	670	840	700	667	700	680	1391	933
17	3508	6321	6186	6581	11270	6830	7278	6414	5609	6635	6321	3528	2343
18	3320	4793	4723	4744	8984	5153	5378	4845	4146	5077	4871	3069	2044
19	2688	4230	4301	4338	8375	4598	4786	4299	3637	4531	4429	2912	1958
20	3477	4841	4817	5093	10778	5472	5681	4937	3849	4844	4948	2997	1978
21	2416	3931	3937	4101	9118	4462	4462	4002	3030	3931	4052	2732	1826
22	2716	3849	3857	3677	6361	4185	4431	3876	3280	4079	3987	2756	1837
SSD = (ตัน/วัน)		4234	4147	4540	15370	5330	5908	4403	2622	4724	4454	1519	2657

พิจารณาสัดส่วนปริมาณตะกอนท้องน้ำเทียบกับปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (%Qb/Qst) โดยใช้ค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำที่ประเมินได้จากวิธีลอเรน (Laursen method) และค่า Qst ที่คำนวณด้วยวิธีเชิงกลศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน มีสมการ คือ

$$Q_{st} \text{ (ton/day)} = [Q_{sb} \text{ (Laursen method)}] + [Q_{sw} \text{ (hydrologic concept)}]$$

$$Q_{st} \text{ (ton/day)} = [Q_{sb} \text{ (Laursen method)}] + 1.857Q_{(cms)}^{1.263} \quad (5.3)$$

ผลการประมาณ %Qb/Qst ของการคำนวณจากชุดข้อมูลทั้ง 15 สถานีที่มีอยู่ แสดงผลแยกรายลุ่มน้ำได้ดังรูปที่ 5-55 โดยเทียบกับค่าอัตราไหลของน้ำ (Q) ของชุดข้อมูลนั้น ๆ จากรูปพบว่า สัดส่วนของปริมาณตะกอนท้องน้ำเทียบกับปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (%Qb/Qst) ไม่ได้เป็นค่าคงที่ 30% เหมือนอย่างเกณฑ์ที่กรมชลประทานใช้ในการประมาณหาค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (กลุ่มงานตะกอนและคุณภาพน้ำ, 2555) แต่ปริมาณตะกอนท้องน้ำนี้มีค่าไม่คงที่ จากชุดข้อมูลที่นำมาศึกษาพบค่าในช่วงตั้งแต่ 0%-60% โดยไม่ได้ขึ้นกับค่าอัตราไหลของน้ำเพียงอย่างเดียว แต่เป็นผลจากการพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของตะกอน



รูปที่ 5-55 สัดส่วนปริมาณตะกอนท้องน้ำเทียบกับปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (%Qb/Qst)

5.5.3. ทดสอบวิธีคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมทั้ง 5 วิธี ด้วยชุดข้อมูลแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537)

เปรียบเทียบผลการสำรวจอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำน่านที่สำรวจโดยไพฑูรย์ (2537) กับผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (Qt) ด้วยวิธีคำนวณทั้ง 5 วิธี ดังต่อไปนี้

1) วิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (sediment-discharge rating curve)

- จำนวนอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม (Qst) ด้วยสมการ คือ

$$\text{สมการจากรูปที่ 5-48 สมการลุ่มน้ำน่าน } Q_{so} = 2.498Q^{1.204}$$

$$\text{สมการจากรูปที่ 5-49 สมการภาคเหนือ } Q_{so} = 2.448Q^{1.297}$$

- จำนวนอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (Qb) โดยประมาณให้มีค่า 30% ของปริมาณตะกอนแขวนลอยที่คำนวณได้ ตามวิธีของกรมชลประทาน

- จำนวนหาผลรวม Qst และ Qb หรือจะคำนวณด้วยสมการ $Q_t = 1.3Q_{st}$ ก็ได้

2) วิธีลอร์เซน (Laursen method)

- จำนวนอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยสมการที่ (3.1) และ (3.2) โดยอ่านค่าฟังก์ชันของ Laursen ในรูปที่ 3-3

3) วิธีดัดแปลงโค้งของลอร์เซน (modified Laursen curve) ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่าน

- จำนวนอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยสมการที่ (3.1) และ (3.2) โดยใช้โค้งของ Laursen ที่ดัดแปลงได้ ในรูปที่ 5-2

4) วิธีลอร์เซนดัดแปลงโดยแมตเดน (Madden's modification of Laursen method)

- จำนวนต่อจากผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่ได้ในข้อที่ 3. โดยนำมาคูณกับสมการของตัวคูณค่าปรับแก้ คือ

$$\text{สมการจากรูปที่ 5-32 ง) สมการลุ่มน้ำน่าน } \text{Adj. factor} = 0.0455Fr^{-0.86}$$

$$\text{สมการจากรูปที่ 5-34 สมการภาคเหนือ } \text{Adj. factor} = 0.0029Fr^{-2.33}$$

5) วิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน

- จากผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมที่ได้ในข้อที่ 2. ที่ได้ในรูปแบบของปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ นำมาใช้คำนวณต่อโดยบวกกับผลการประเมินปริมาณตะกอนลุ่มน้ำ (Qsw) มีสมการคือ

$$\text{สมการจากรูปที่ 5-39 สมการลุ่มน้ำน่าน } Q_{sw} = 1.910Q^{1.182}$$

$$\text{สมการจากรูปที่ 5-41 สมการภาคเหนือ } Q_{sw} = 1.857Q^{1.263}$$

แสดงผลการทดสอบลำดับชุดข้อมูลที่ 10-22 ของทั้ง 5 วิธีการคำนวณดังตารางที่ 5-17 ผลที่ได้พบว่า วิธี sediment-discharge rating curve ที่ใช้สมการภาคเหนือ ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่น้อยที่สุดประมาณ 9,300 ตัน/วัน ในขณะที่วิธีเชิงขลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกันที่ใช้สมการภาคเหนือ ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากกว่าเล็กน้อย 10,770 ตัน/วัน แต่การคำนวณด้วยวิธีของกรมชลประทานนี้ ให้ผลการประเมินที่สูงเกินจริงถึง 2.5 เท่า (11 จาก 13 ชุดข้อมูลประเมินได้สูงเกินจริง) หรือในขณะที่วิธีเชิงขลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน ให้ผลการประเมินที่สูงเกินจริงเพียง 1.25 เท่า ทั้งนี้ สันเกตว่าชุดข้อมูลที่ 10 และ 11 ซึ่งมีผลการสำรวจปริมาณตะกอนรวมเกิน 10,000 ตัน/วัน วิธีเชิงขลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกันจะให้ผลการประเมินได้ต่ำกว่าค่าจริง

เมื่อพิจารณาด้วยลำดับชุดข้อมูลที่ 12-22 ดังตารางที่ 5-18 พบว่า วิธีเชิงขลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกันที่ใช้สมการภาคเหนือ มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่น้อยที่สุด คือประมาณ 1,500 ตัน/วัน รองลงมาเป็นวิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เซน (Modified Laursen curve) ด้วยข้อมูลแม่น้ำน่าน และวิธี sediment-discharge rating curve ที่ใช้สมการลุ่มน้ำน่าน คำนวณได้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 2,200 และ 2,500 ตามลำดับ

สรุปได้ว่า วิธีเชิงขลศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกันที่ใช้สมการภาคเหนือ ให้ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของชุดข้อมูลนี้ได้ดีที่สุด

ตารางที่ 5-17 ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (ตัน/วัน) ด้วยวิธีการคำนวณทั้ง 5 วิธี ของลำดับชุดข้อมูล 10-22

ลำดับชุดข้อมูล	ผลสำรวจอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนรวมของไฟฟูร์รี่ (2537)	วิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (Sediment-Discharge Rating Curve)		วิธีดัดแปลงโค้งของลอเรนส์ (Modified Laursen curve)	วิธีลอเรนส์ (Laursen method)		วิธีปรับปรุงโค้งของลอเรนส์ (Madden's modification of Laursen method)	วิธีเชิงศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts)	
		สมการลุ่มน้ำ	สมการภาคเหนือ		สมการลุ่มน้ำ	สมการภาคเหนือ		สมการลุ่มน้ำ	สมการภาคเหนือ
10	13245	5420	9422	462	6013	1668	2345	3229	4921
11	11011	4969	8579	278	3495	1068	1772	2819	4348
12	465	1321	2060	2	20	10	38	695	1016
13	856	1768	2818	5	42	19	66	927	1382
14	735	1786	2849	5	33	15	52	936	1396
15	715	1738	2768	3	23	10	31	910	1355
16	732	1781	2841	4	30	14	51	933	1391
17	3508	3991	6775	294	3911	1168	1866	2343	3528
18	3320	3524	5926	230	3031	949	1641	2044	3069
19	2688	3313	5544	252	3439	998	1518	1958	2912
20	3477	3506	5892	174	2271	674	1063	1978	2997
21	2416	3174	5293	189	2512	759	1236	1826	2732
22	2716	3209	5358	183	2412	780	1425	1837	2756
SSD (ตัน/วัน) =		10200	9315	18144	10653	16237	14905	13210	10770
SSE (%) =		29.3	24.4	92.7	32.0	74.2	62.6	49.1	32.7
R ² =		0.808	0.818	0.689	0.660	0.636	0.582	0.792	0.805
\overline{R}_D =		1.54	2.50	0.04	0.53	0.16	0.28	0.84	1.25

ตารางที่ 5-18 ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (ตัน/วัน) ด้วยวิธีการคำนวณทั้ง 5 วิธี ของลำดับชุดข้อมูล 12-22

ลำดับชุดข้อมูล	ผลสำรวจอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนรวมของไซทูเรีย (2537)	วิธีคำนวณสัมพัทธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (Sediment-Discharge Rating Curve)		วิธีลดรูป (Laursen method)	วิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เรน (Modified Laursen curve)	วิธีลอว์เรนดัดแปลงโดยแมคเคน (Madden's modification of Laursen method)		วิธีเชิงศาสตร์และอุทกวิทยาาร่วมกัน (combined hydraulic and hydrologic concepts)	
		สมการลุ่มน้ำ	สมการภาคเหนือ			สมการลุ่มน้ำ	สมการภาคเหนือ	สมการลุ่มน้ำ	สมการภาคเหนือ
12	465	1321	2060	2	20	10	38	695	1016
13	856	1768	2818	5	42	19	66	927	1382
14	735	1786	2849	5	33	15	52	936	1396
15	715	1738	2768	3	23	10	31	910	1355
16	732	1781	2841	4	30	14	51	933	1391
17	3508	3991	6775	294	3911	1168	1866	2343	3528
18	3320	3524	5926	230	3031	949	1641	2044	3069
19	2688	3313	5544	252	3439	998	1518	1958	2912
20	3477	3506	5892	174	2271	674	1063	1978	2997
21	2416	3174	5293	189	2512	759	1236	1826	2732
22	2716	3209	5358	183	2412	780	1425	1837	2756
SSD (ตัน/วัน) =		2510	8139	7114	2166	5545	4240	2658	1519
SSE (%) =		10.8	113.4	86.7	8.0	52.6	30.8	12.1	4.0
R ² =		0.975	0.975	0.900	0.890	0.898	0.900	0.968	0.971
\overline{R}_D =		1.74	2.82	0.04	0.55	0.17	0.30	0.95	1.41

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1. สรุปผลการศึกษา

ผลที่ได้จากการศึกษาแยกเป็นหัวข้อหลักได้ดังนี้ การศึกษาคูณสมบัติของวัสดุตะกอนท้องน้ำ การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม ทั้งนี้ หากสรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์การศึกษาที่ตั้งไว้ จะได้ว่า

- 1) วิธี Sediment-discharge rating curve ของกรมชลประทาน สามารถใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวมได้ดี เนื่องจากตะกอนแขวนลอยที่วัดได้ส่วนใหญ่ ไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำ และมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับอัตราไหลของน้ำ แต่วิธีนี้ไม่สามารถใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำได้
- 2) วิธีของ Laursen ให้ผลการประเมิน อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำและ อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ ได้สอดคล้องกับข้อมูลการสำรวจตะกอนที่มีอยู่ วิธีนี้จึงสามารถอธิบายข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนวัสดุท้องน้ำ (total bed material load) ที่สอดคล้องกับแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทยได้
- 3) วิธีเชิงศาสตร์และอุทกวิทยาร่วมกัน เป็นวิธีที่เหมาะสมในการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วย การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนวัสดุท้องน้ำ (total bed material load) ด้วยวิธี Laursen และ ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยส่วนที่ไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำ ด้วยวิธี sediment-discharge rating curve ซึ่งได้สมการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมคือ

$$\text{Total load} = \frac{86400}{100} \cdot Q_{(cms)} \left[\sum p \left(\frac{d}{y} \right)^{\frac{7}{6}} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1 \right) f \left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\omega} \right)_{total} \right] + 1.857 Q_{(cms)}^{1.263}$$

6.1.1. คุณสมบัติของวัสดุตะกอนท้องน้ำ

การวิเคราะห์การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำพบว่า ตะกอนแม่น้ำปิง วัง ยม และ น่าน มีขนาดเฉลี่ยของตะกอน (d_m) อยู่ในช่วง 0.29-2.24, 0.38-1.31, 0.17-2.01 และ 0.13-0.59 มม. ตามลำดับ โดยแม่น้ำปิงพบการกระจายขนาดของตะกอนที่จำแนกได้เป็นช่วงกว้าง ตั้งแต่ขนาดของ

ทรายละเอียด (fine sand) ไปจนถึงขนาดกรวดละเอียดมาก (very fine granules) สำหรับแม่น้ำวัง ส่วนใหญ่ตะกอนอยู่ในช่วงของทรายขนาดหยาบ (coarse sand) แม่น้ำยมสามารถจำแนกขนาดตะกอนได้เป็นช่วงกว้าง ตั้งแต่ขนาดของทรายละเอียด (fine sand) ไปจนถึง ทรายขนาดหยาบมาก (very coarse sand) ส่วนแม่น้ำน่านพบขนาดเฉลี่ยของตะกอนเล็กกว่าของแม่น้ำปิง วัง และยม ซึ่งอยู่ในช่วงของทรายขนาดละเอียดมาก (very fine sand) ค่อนไปทางทรายหยาบปานกลาง (Medium sand)

ค่าเฉลี่ยของเม็ดวัสดุท้องน้ำ (d_m) มีค่าสูงกว่าค่ามัธยฐาน (d_{50}) ของเม็ดวัสดุท้องน้ำเล็กน้อย โดยแม่น้ำปิง วัง ยม และ น่าน มีค่ามัธยฐานของตะกอน อยู่ในช่วง 0.18-1.94, 0.34-0.92, 0.15-1.26 และ 0.13-0.38 มม. ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบขนาดของวัสดุท้องน้ำกับข้อมูลที่เคยมีผู้สำรวจไว้ เฉพาะตัวอย่างวัสดุท้องน้ำที่เก็บ ณ ตำแหน่งเดียวกัน พบว่า ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเฉลี่ยของตะกอนมากนัก โดยขนาดมัธยฐานของตะกอนท้องน้ำ (d_{50}) ที่สถานี W.4A มีค่า 0.92 มม. ซึ่งใกล้เคียงกับ Bidorn et al. (2015) ที่ได้ 1.02 มม. สำหรับตะกอนท้องน้ำที่สถานี N.7A มีขนาดมัธยฐาน (d_{50}) เท่ากับ 0.32 มม. ซึ่งใกล้เคียงกับ Bidorn et al. (2015) ที่วัดได้ 0.39 มม. ในครั้งการสำรวจเมื่อปี 2554 และเช่นเดียวกันกับการสำรวจตะกอนวัสดุท้องน้ำของแม่น้ำน่าน เมื่อปี 2535 บริเวณอำเภอบางมูลนาก (กม.456) ซึ่งใกล้กับสถานี N.8A ในปัจจุบัน มีขนาดมัธยฐาน (d_{50}) เท่ากับ 0.21 มม. เปรียบเทียบกับขนาดเฉลี่ย (d_{50}) ของวัสดุท้องน้ำที่สถานี N.8A ซึ่งทำการวัดเมื่อปลายปี 2558 มีค่า 0.17 มม. แสดงให้เห็นว่า วัสดุท้องน้ำมีการเปลี่ยนแปลงขนาดไม่มากนัก แม้เวลาจะผ่านไปนานหลายปีแล้วก็ตาม

6.1.2. สรุปผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนท้องน้ำ

อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่วัดได้ โดยปริมาณตะกอนท้องน้ำ ไม่ได้เป็นที่สัดส่วนคงที่เมื่อเทียบกับปริมาณตะกอนแขวนลอย ทั้งนี้ แต่ละสถานีจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำที่ต่างกันไป ขึ้นกับคุณสมบัติของชลศาสตร์การไหล และขนาดวัสดุท้องน้ำของลำน้ำนั้น ๆ

ในความเป็นจริง หรือข้อเท็จจริงทางกายภาพนั้น ตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำนั้น จะต้องเริ่มต้นที่การเกิดเป็นตะกอนท้องน้ำที่เคลื่อนที่ (bed load) ก่อน หากวัสดุท้องน้ำยังไม่เคลื่อนที่ (ไม่มี bed load) ก็จะไม่มีการวัสดุท้องน้ำขึ้นไปเป็นตะกอนแขวนลอยได้ สำหรับวิธีการคำนวณของ Laursen ซึ่งพัฒนามาจากข้อมูลในห้องปฏิบัติการ จะสามารถวัดตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ (bed material) ได้เพียงอย่างเดียว ไม่มีตะกอนที่เกิดจากการชะล้างผิวดินลาดด้านข้างลำน้ำหรือ

ผิวดินสองฝั่งเข้าสู่ลำน้ำ ที่อยู่ในรูปแบบของตะกอนลุ่มน้ำรวมอยู่ด้วย แต่ในแม่น้ำธรรมชาตินั้น ตะกอนแขวนลอยที่สำรวจได้อาจมีบางส่วนที่ไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำก็เป็นได้

ดังนั้น จากผลการคำนวณปริมาณตะกอนท้องน้ำที่พบว่า ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ หรือมีอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเป็นศูนย์ ในขณะที่มีอัตราการเคลื่อนที่ของปริมาณตะกอนแขวนลอยเกิดขึ้น จึงอาจสรุปได้ว่า ตะกอนแขวนลอยที่วัดได้ ณ ขณะนั้นไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำ แต่เป็นส่วนที่มาจากตะกอนลุ่มน้ำ นั่นเอง

6.1.3. สรุปผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนรวม

การประมาณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม (Qst) ด้วย sediment-discharge rating curve โดยใช้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอัตราการไหลของน้ำ (Q) เพียงตัวแปรเดียว พบว่าวิธีนี้จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ (statistical error of estimate) ที่ดีกว่าวิธีลอว์เซน (Laursen method) และวิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เซน (modified Laursen curve) แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวก็ไม่ได้ให้ค่าที่เป็นจริงในทุกช่วงของความสัมพันธ์ เช่นในช่วงอัตราการไหลของน้ำที่น้อยมาก ๆ สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวยังคงให้ค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม (Qst) ซึ่งในความเป็นจริง หรือข้อเท็จจริงทางกายภาพนั้น ตะกอนแขวนลอยที่เกิดจากวัสดุท้องน้ำ จะต้องเริ่มต้นที่การเกิดเป็นตะกอนท้องน้ำที่เคลื่อนที่ (bed load) ก่อน หากวัสดุท้องน้ำยังไม่เคลื่อนที่ (ไม่มี bed load) ก็จะไม่มีการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำขึ้นไปเป็นตะกอนแขวนลอยได้ และในสภาวะเงื่อนไขที่วัสดุท้องน้ำจะเริ่มเคลื่อนที่ (initial of motion) นั้น จะต้องมีความแรงมาขับเคลื่อน (driving force) เช่น แรงเฉือนขอบเขต (boundary shear) และแรงเฉือนของเม็ดวัสดุ (particle shear) เป็นต้น ที่ต้องมีมากกว่าแรงต้าน (resisting force) อันได้แก่ แรงเฉือนวิกฤตของวัสดุ (critical shear) ตามหลักกลศาสตร์ของแรงที่กระทำต่อชิ้นวัตถุ

ดังนั้น ในวิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล ที่ให้ค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยรวม (Qst) ที่อัตราการไหลของน้ำ (Q) ต่ำ ๆ จึงเป็นค่าที่ไม่เป็นจริงตามหลักกลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของตะกอน (mechanics of sediment transport) ทั้งนี้วิธีลอว์เซน (Laursen method) และวิธีที่ปรับปรุงวิธีของ Laursen ได้แสดงถึงขอบเขตที่จำกัด (boundary limit) ของอัตราการไหลที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยได้ ที่ค่าอัตราการไหลที่ต่ำที่สุดช่วงหนึ่งด้วย

ผลการประเมินพบว่า วิธี Laursen ส่วนใหญ่ให้ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวมที่น้อยกว่าจริง (underestimate) ส่วนวิธีดัดแปลงโค้งของลอว์เซน (modified

Laursen curve) ส่วนใหญ่ให้ผลการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวมที่สูงเกินจริง (overestimate) และวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden จะให้ผลการคำนวณได้ใกล้เคียงข้อมูลการสำรวจของกรมชลประทาน ได้มากกว่าทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมา

สำหรับวิธีการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยวิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยา ร่วมกัน อาศัยแนวคิดเชิงชลศาสตร์ (hydraulic concept) คือวิธี Laursen มาประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนวัสดุท้องน้ำ (total bed material load) และอาศัยแนวคิดเชิงอุทกวิทยา (hydrologic concept) ที่ว่า อัตราไหลของน้ำที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนลุ่มน้ำ (non-bed-material load) พบว่า การผสมผสานหลักการเชิงชลศาสตร์และหลักการเชิงอุทกวิทยา สามารถอธิบายข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทยได้ดี

เปรียบเทียบวิธีการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมด้วยวิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยา ร่วมกัน กับวิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden พบว่า วิธีเชิงชลศาสตร์และอุทกวิทยา ร่วมกัน สามารถอธิบายข้อมูลการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยได้ดีกว่า เพราะกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเกิดขึ้น วิธี Laursen ดัดแปลงโดย Madden จะไม่สามารถประเมินค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยได้เลย ต่างจากวิธีนี้ที่สามารถประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยได้

ส่วนแนวคิดเชิงอุทกวิทยาที่ว่า อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ ซึ่งเป็นตะกอนแขวนลอยส่วนที่ไม่ได้มาจากวัสดุท้องน้ำ จะมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำ ได้รับการทดสอบด้วยข้อมูลการสำรวจจริงของไพฑูรย์ (2537) และ Bidorn et al. (2015) โดยพบว่ามีความสัมพันธ์ของข้อมูลเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ที่ประมาณได้ ดังนั้น วิธีการนี้จึงสามารถนำมาใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำได้อย่างเหมาะสม

พิจารณาสัดส่วนของปริมาณตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ เทียบกับปริมาณตะกอนแขวนลอยรวมของแม่น้ำในภาคเหนือ ($\%Q_{sw}/Q_{st}$) ได้ประมาณร้อยละ 60 และสัดส่วนร้อยละของปริมาณตะกอนแขวนลอยที่มาจากวัสดุท้องน้ำ ($\%Q_{sb}/Q_{st}$) คิดเป็นร้อยละ 40 แสดงว่า ปริมาณตะกอนแขวนลอยรวมของแม่น้ำในภาคเหนือส่วนใหญ่ไม่ได้มาจากการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ แต่มาจากส่วนของตะกอนแขวนลอยลุ่มน้ำ นี่ถือเป็นเหตุผลหนึ่ง ที่ทำให้การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวมด้วยวิธีโค้งความสัมพันธ์ปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล (sediment-discharge rating curve) ได้ผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติที่ดี

ข้อดีของการใช้แนวคิดเชิงชลศาสตร์ โดยหลักการของ Laursen มาประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม คือ หลักการของ Laursen สามารถนำไปใช้กับแต่ละแม่น้ำทั้ง 4 สายในภาคเหนือได้เลย โดยไม่จำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลปริมาณตะกอนแขวนลอยมาเป็นข้อมูลขั้นต้นใน

การประเมินปริมาณตะกอนแต่อย่างใด ทั้งวิธีการนี้ยังมีจุดเด่นที่สามารถให้ค่าของอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (bed load) ได้ด้วย ต่างจากวิธี sediment-discharge rating curve ที่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลของการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยรวม (Qst) เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำ (Q) จึงจะได้สมการความสัมพันธ์ และสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวก็มีความแตกต่างกันในแต่ละแม่น้ำและแต่ละตำแหน่งสถานีของแม่น้ำ และวิธีนี้ก็ไม่สามารถใช้ประเมินอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำได้

สำหรับการพิจารณาค่าวัดความคลาดเคลื่อนทางสถิติของผลการคำนวณโดยวิธีต่างๆ ค่าที่ได้แสดงไว้ ไม่ได้หมายความว่าวิธีที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยจะสามารถอธิบายข้อมูลการเคลื่อนที่ของตะกอนในลำน้ำได้ดีกว่าวิธีที่มีความคลาดเคลื่อนมากแต่อย่างใด ค่าแสดงความคลาดเคลื่อนจึงไม่สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความถูกต้องของวิธีการที่ใช้อธิบายข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยที่ได้จากการสำรวจโดยสิ้นเชิง ต้องพิจารณาจากตัวชี้วัดอื่น ๆ ที่เหมาะสมด้วย



6.2. ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ประเทศไทยมีข้อมูลการสำรวจปริมาณตะกอนที่จำกัด โดยเฉพาะข้อมูลของปริมาณตะกอนท้องน้ำ ซึ่งวัดได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูง แต่ก็ยังเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการศึกษาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในลำน้ำ จึงจำเป็นต้องมีการสำรวจข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของตะกอนเพิ่มเติม เช่น ข้อมูลปริมาณตะกอนท้องน้ำ ปริมาณตะกอนแขวนลอย และลักษณะวัสดุท้องน้ำ หากมีจำนวนชุดข้อมูลมากพอ เป็นการเพิ่มความหลากหลายของข้อมูล ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์วิธีการที่ใช้สำหรับประเมินปริมาณตะกอนมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้นด้วย

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย และยังไม่พบการศึกษาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำในภาคอื่น ๆ ดังนั้น หากมีผู้สนใจศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนรวมของแม่น้ำอื่น ๆ ในประเทศไทยก็จะเป็นการดียิ่ง ทำให้ได้รู้ลักษณะการเคลื่อนที่ของตะกอนในแต่ละลำน้ำของประเทศไทย ว่าเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

การสำรวจวัสดุตะกอนท้องน้ำจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำที่เหมาะสมกับลักษณะตะกอนตลอดจนสภาพแวดล้อม สภาพการไหล ณ ขณะนั้น สำหรับเครื่องตักหน้าดิน (Birge-Ekman grab sampler) ที่ใช้ในการสำรวจครั้งนี้ แสดงในภาพที่ ข-1 ถือว่าเป็นเครื่องมือขนาดเล็ก ซึ่งใช้งานได้ดีกับแม่น้ำที่มีน้ำลึกไม่มากนัก และมีความเร็วการไหลต่ำ ๆ มิฉะนั้นหากน้ำไหลแรง เครื่องมือจะถูกพัดไปตามแรงการไหลของน้ำ การเก็บวัสดุท้องน้ำด้วยเครื่องมือนี้จะทำได้ยากยิ่ง ทั้งนี้ ในช่วงที่เก็บตะกอน วันที่ 25 ถึง 29 ธันวาคม 2558 ถือเป็นช่วงน้ำแล้งและมีน้ำน้อย จึงสามารถใช้เครื่องมือชนิดนี้เก็บตะกอนได้อย่างสำเร็จ

เกณฑ์ทดสอบความถูกต้องของสมการ ทั้ง 3 อย่าง คือ ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (%SSE) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) และ ค่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ($\overline{R_D}$) มีความผันแปรของค่าสูง ขึ้นกับจุดข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ หากมีค่าผิดปกติ (outlier) จะทำให้ค่าผันแปรได้มาก โดยในการศึกษานี้ ไม่ได้พิจารณาแยกค่าผิดปกติออกก่อนการวิเคราะห์แต่อย่างใด เนื่องจากทุกชุดข้อมูลที่นำมาศึกษาเป็นข้อมูลการสำรวจจริง แม้มีค่าที่สูงหรือต่ำเกินกว่าข้อมูลอื่น ๆ มาก ก็ถือว่ามีความเป็นไปได้ในทางธรรมชาติแทบทั้งสิ้น

แม่น้ำปิงตอนล่างมีสถานีวัดตะกอนของกรมชลประทานเพียงสถานีเดียวคือ สถานี P.78 คลองขลุ้ง ที่บ้านสามเรือน อ.คลองขลุ้ง จ.กำแพงเพชร จากการออกภาคสนามพบว่า แม่น้ำปิงตอนล่างนี้ น่าจะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำอยู่ไม่น้อย จากการสังเกตพื้นท้องน้ำพบว่ามีลักษณะเป็นริ้วคลื่น (ripples) แสดงดังรูปที่ 6-1 และรูปที่ 6-2 ซึ่งถ่ายจากบนสะพานเฉลิมพระเกียรติ 2 ใกล้กับสถานีวัดน้ำท่า P.15 บ้านคลองขลุ้ง ต.คลองขลุ้ง อ.คลองขลุ้ง จ.กำแพงเพชร



รูปที่ 6-1 พื้นที่อ่างน้ำแม่ น้ำปิง ใกล้กับสถานีวัดน้ำท่า P.15



รูปที่ 6-2 พื้นที่อ่างน้ำแม่ น้ำปิง (2) ใกล้กับสถานีวัดน้ำท่า P.15

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กนกพร เลิศเดชาภัทร, เสรี จันทโรยธา, บุศวรรณ บิดร, และ อนุรักษ ศรีอริยวัฒน์. (2558). *อัตรา การเคลื่อนที่ของตะกอนของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย*. การประชุมวิชาการ วิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งชาติ ครั้งที่ 6, 5-7 สิงหาคม 2558 ณ โรงแรมเซ็นทาราไฮเต็ลแอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี. หน้า 396-406.
- กลุ่มงานตะกอนและคุณภาพน้ำ. (2555). *การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอย กับพื้นที่ลุ่มน้ำ ใน 25 ลุ่มน้ำหลัก*. กลุ่มงานตะกอนและคุณภาพน้ำ, ส่วนอุทกวิทยา, สำนัก อุทกวิทยาและบริหารน้ำ, กรมชลประทาน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ณัฐวุฒิ เอี่ยมกาญจน์. (2552). *น้ำหลากของแม่น้ำปิงช่วงพื้นที่เมืองเชียงใหม่*. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- ทรงศิริ แต่สมบัติ. (2549). *การพยากรณ์เชิงปริมาณ*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นริสา หลีกกาญจนะ. (2546). *ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยรายปีในแม่น้ำกับปัจจัย ต่าง ๆ ทางด้านน้ำฝน น้ำท่า และคุณลักษณะของลุ่มน้ำ*. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- นฤนารถ มีบุญมาก. (2547). *การประมาณปริมาณตะกอนท้องน้ำและผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง การใช้ที่ดินที่มีต่อปริมาณตะกอนแขวนลอยในลุ่มน้ำภาคเหนือ*. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- ไพฑูรย์ กิติสุนทร. (2537). *การเคลื่อนที่ของตะกอนและปัญหาการเดินเรือในแม่น้ำน่านตอนล่าง*. (วิทยานิพนธ์ปริญญา ดุษฎีบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2537). *โครงการศึกษาเพื่อ จัดทำแผนหลักในการอนุรักษ์และพัฒนาสิ่งแวดล้อมแม่น้ำกก จังหวัดเชียงราย*. โครงการวิจัย จากแหล่งทุนภายนอก เสนอต่อ สำนักงานโยธาธิการ จังหวัดเชียงราย.
- รัตนา รัตนจารุรักษ์ และ ลำภูมิตี เทียบชัยภูมิ. (2558). *การศึกษาปริมาณตะกอนท้องน้ำช่วงฤดูน้ำ หลากในแม่น้ำลำพระเพลิง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา*. *วารสารสมาคมนักอุทกวิทยาไทย*, ฉบับที่ 1-2558, หน้า 283-290.
- สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน). (2555a). *การดำเนินการด้านการ รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ และ*

แบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง ลุ่มน้ำน่าน. รายงานการศึกษา. กรุงเทพมหานคร: บริษัท แอสตีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด.

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน). (2555b). การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง ลุ่มน้ำปิง. รายงานการศึกษา. กรุงเทพมหานคร: บริษัท แอสตีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด.

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน). (2555c). การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง ลุ่มน้ำยม. รายงานการศึกษา. กรุงเทพมหานคร: บริษัท แอสตีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด.

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน). (2555d). การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง ลุ่มน้ำวัง. รายงานการศึกษา. กรุงเทพมหานคร: บริษัท แอสตีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด.

เสรี จันทรโยธา และ ชัชวาลย์ ทักษอุดม. (2538). การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพลำน้ำและท้องน้ำของแม่น้ำกก ในช่วง อ.เมือง จ.เชียงราย, การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 2, 9-11 พฤศจิกายน 2538 ณ โรงแรมปางสวนแก้ว จ.เชียงใหม่. หน้า 246-260.

เสรี จันทรโยธา และ ชัยพันธุ์ รักรวิชัย. (2556). *ชลศาสตร์การไหลในทางน้ำเปิดขั้นพื้นฐาน*. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เสรี จันทรโยธา และ ชัยพันธุ์ รักรวิชัย. (2557). *วิศวกรรมชลศาสตร์*. กรุงเทพมหานคร: บริษัท อำนวยเวปพริ้นติ้ง จำกัด.

ภาษาอังกฤษ

Bagnold, R. A. (1966). *An approach to the sediment transport problem from general physics* (4221). Retrieved from <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp4221>

Bidorn, B., Chanyotha, S., Kish, S. A., Donoghue, J. F., Bidorn, K., and Mama, R. (2015). The effects of Thailand's Great Flood of 2011 on river sediment discharge in the upper Chao Phraya River basin, Thailand. *International Journal of Sediment Research*, 30(4), 328-337. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.10.001>

Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*: McGraw-Hill Book Company.

- Copeland, R. R., and Thomas, W. A. (1989). *Corte Madera Creek sedimentation study. Numerical Model Investigation*. Corte Madera Creek Flood Control Project, Marin County. Prepared for U.S. Army Engineer District, Sacramento, California. January 1989.
- Gilbert, G. K. (1914). The Transportation of Debris by Running Water. *USGS Professional Paper 86*.
- Gray, J. R., and Simões, F. J. M. (2008). Estimating Sediment Discharge *Sedimentation Engineering* (pp. 1067-1088).
- Kodoatie, R. J. (1999). *Sediment Transport Relations in Alluvial Channels*. (Ph.D. Dissertation), Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Kodoatie, R. J., Simons, D. B., Julien, P. Y., and Albertson, M. L. (2000). *Prediction of Sediment Transport Rate in Irrigation Canals Using Modified Laursen Methodology*. Paper presented at the International Conference on the Challenges Facing Irrigation and Drainage in the New Millennium, Fort Collins, Colorado, USA.
- Lane, E. W. (1955). Design of Stable Channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 120, Paper No. 2776*, pp. 1234-1260.
- Lane, E. W., and Borland, W. M. (1951). Estimating bed load. *Eos, Transactions American Geophysical Union, 32(1)*, 121-123. doi:10.1029/TR032i001p00121
- Laursen, E. M. (1958). The total sediment load of streams. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 84(HY1)*, 1530-1531 to 1530-1536.
- Madden, E. B. (1985). *Modified Laursen Method for Estimating Bed-material Sediment Load*: prepared for U.S. Army Corps of Engineers; monitored by Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, HL-93-3.
- Madden, E. B. (1993). *Modified Laursen Method for Estimating Bed-material Sediment Load*: Contract Report HL-93-3, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*: Prentice Hall.
- Simons, D. B., and Şentürk, F. (1992). *Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics*: Water Resources Publications.

- Vanoni, V. A. (2006). Sediment Transportation Mechanics *Sedimentation Engineering: Classic Edition* (pp. 11-189): American Society of Civil Engineers.
- Woo, H. S., Julien, P. Y., and Richardson, E. V. (1986). Washload and Fine Sediment Load. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(6), 541-545.
doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:6(541)
- Yang, C. T. (1996). *Sediment Transport: Theory and Practice* (International ed.). New York ; Singapore: McGraw-Hill.
- Ziegler, A. D., Sidle, R. C., Phang, V. X. H., Wood, S. H., and Tantasirin, C. (2014). Bedload transport in SE Asian streams—Uncertainties and implications for reservoir management. *Geomorphology*, 227, 31-48.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.015>





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการสำรวจตะกอนแม่น้ำน่านของไพฑูรย์ (2537) และการคำนวณ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การเคลื่อนที่ของตะกอนและปัญหาการเดินเรือในแม่น้ำน่านตอนล่าง” ของ ไพฑูรย์ กิตติสุนทร ได้มีการศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนในแม่น้ำน่านตอนล่างไว้ โดยมีการสำรวจคุณสมบัติชลศาสตร์ลำน้ำ และการสำรวจตะกอน ทั้งตะกอนแขวนลอย ตะกอนท้องน้ำ และวัสดุตะกอนท้องน้ำ แสดงข้อมูลที่น่ามาใช้วิเคราะห์อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอน ตลอดจนค่าการคำนวณต่าง ๆ ดังตาราง ก-1 ถึง ตาราง ก-8

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในการศึกษานี้ ได้แบ่งแต่ละขนาดของวัสดุท้องน้ำเป็นส่วน ๆ (fraction of size) แต่ละสัดส่วนขนาดจะมีขนาดเฉลี่ยของตะกอน (mean size) เป็น d และขนาดเฉลี่ยของตะกอนทั้งหมด เป็น d_m

สำหรับการคำนวณค่า $\left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right)$ ในการศึกษานี้ หากหน่วยแรงเฉือนวิกฤติของเม็ดวัสดุ (τ_c) มีค่ามากกว่า หน่วยแรงเฉือนของวัสดุ (particle shear) (τ'_0) จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายความว่าไม่เกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนที่มีสัดส่วนขนาดเหล่านั้น และกำหนดค่าให้เป็นศูนย์แทน

ดังนั้น ในการหาค่าจุดฟังก์ชันของปริมาณตะกอนรวม และจุดฟังก์ชันของปริมาณตะกอนท้องน้ำใหม่ ซึ่งแสดงค่าไว้ใน 2 คอลัมน์สุดท้ายในตาราง ก-1 ถึง ตาราง ก-8 จะพิจารณาเฉพาะส่วนที่วัสดุท้องน้ำเคลื่อนที่ได้ ซึ่งเป็นส่วนที่มีอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนเกิดขึ้น หรือมีค่า $\left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right)$ มากกว่าศูนย์นั่นเอง

ตารางที่ ก-2 ค่าการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแม่น้ำนาน (ต่อ)

No	Date	Sta. km	Q_w	W	S_f	V	y	d_m	d	p	ω	τ_c	τ_0'	τ_0	$\frac{\sqrt{\tau_0 p}}{\omega} \left(\frac{\tau_0'}{\tau_c} - 1 \right)$	\bar{c}_b	$\frac{Cal}{Q_b}$	$\left(\frac{\sigma}{d/0.2\lambda} \right)^2$	\bar{c}_t	$\frac{Cal}{Q_t}$	$\left(\frac{\sigma}{d/0.2\lambda} \right)^2$	$\frac{Cal}{Q_t}$	$\left(\frac{\sigma}{d/0.2\lambda} \right)^2$	
			cms	m	m	m/s	m	ft	ft		fr/s					% (Ob/O)	Tons/day		% (Qt/Q)	Tons/day				
4	04-08-35	443	354.7	70.02	0.000091	0.91	5.43	0.0020698	-	-	-	15	-	-	10.15	11.76	19.30	0.000006	1.8	1044.27	0.000312	95.6	3.25	
									VFS	0.000285	0.01	0.023	0.00114	0.014543	0.101132									
									FS	0.00058	0.215	0.071	0.00232		3.23	5.27	14.45	0.000095	29.2	84.04	0.000554	169.8	2.43	
									MS	0.001158	0.52	0.165	0.00463		1.38	2.14	11.66	0.000169	51.8	22.14	0.000321	98.4	1.96	
									CS	0.00232	0.13	0.375	0.00928		0.61	0.57	9.47	0.000020	6.3	11.09	0.000024	7.3	1.60	
									VCS	0.00464	0.662	0.707	0.01856		0.32	0	8.07	0	0	8.26	0	0	0	
									VFG	0.00926	0.388	1.225	0.03704		0.19	0	7.02	0	0	6.99	0	0	0	
									FG	0.0186	0.02	1.813	0.07440		0.13	0	6.36	0	0	6.29	0	0	0	
									MG	0.0371	0	2.563	0.14840		0.09	0	5.82	0	0	5.82	0	0	0	
															0.00291	89.0	0.001211	371.1						
5	05-08-35	442	389.4	83.42	0.000077	0.81	5.5	0.0029834	-	-	-	12	-	-	9.39	10.36	18.93	0.000003	1.0	878.90	0.000137	46.0	2.84	
									VFS	0.000285	0.006	0.023	0.00114	0.012946	0.086679									
									FS	0.00058	0.244	0.071	0.00232		2.99	4.58	14.17	0.000091	30.5	69.79	0.000447	150.4	2.13	
									MS	0.001158	0.5	0.165	0.00463		1.28	1.79	11.43	0.000132	44.3	20.50	0.000236	79.5	1.72	
									CS	0.00232	0.115	0.375	0.00928		0.56	0.40	9.29	0.000012	4.1	10.64	0.000014	4.7	1.39	
									VCS	0.00464	0.05	0.707	0.01856		0.30	0	7.91	0	0	8.03	0	0	0	
									VFG	0.00926	0.04	1.225	0.03704		0.17	0	6.88	0	0	6.83	0	0	0	
									FG	0.0186	0.015	1.813	0.07440		0.12	0	6.23	0	0	6.19	0	0	0	
									MG	0.0371	0.03	2.563	0.14840		0.08	0	5.71	0	0	5.71	0	0	0	
															0.00238	80.0	0.000834	280.6						
6	06-08-35	441	365.0	71.96	0.000072	0.84	5.83	0.0032953	-	-	-	90	-	-	9.35	11.39	18.91	0.000002	0.5	870.95	0.000070	21.9	26.65	
									VFS	0.000285	0.003	0.023	0.00114	0.014128	0.085947									
									FS	0.00058	0.222	0.071	0.00232		2.98	5.09	14.16	0.000086	27.0	69.35	0.000420	132.3	19.95	
									MS	0.001158	0.355	0.165	0.00463		1.28	2.05	11.42	0.000100	31.4	20.41	0.000178	56.2	16.10	
									CS	0.00232	0.12	0.375	0.00928		0.56	0.52	9.28	0.000016	4.9	10.61	0.000018	5.7	13.08	
									VCS	0.00464	0.1462	0.707	0.01856		0.30	0	7.90	0	0	8.02	0	0	0	
									VFG	0.00926	0.1138	1.225	0.03704		0.17	0	6.88	0	0	6.82	0	0	0	
									FG	0.0186	0.04	1.813	0.07440		0.12	0	6.23	0	0	6.18	0	0	0	
									MG	0.0371	0	2.563	0.14840		0.08	0	5.71	0	0	5.71	0	0	0	
															0.00203	63.9	0.000685	216.0						

ตารางที่ ก-3 ค่าการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแม่น้ำน่าน (ต่อ)

No	Date	Sta. km	Q _w cms	W m	S _f	V m/s	y m	d _m ft	Obs Q _s Tons/day	Obs Q _b Tons/day	Obs Q _t Tons/day	Size class	d ft	p	ω	τ _c	τ ₀	τ ₀ / (τ _c - 1)	$\sqrt{\frac{\tau_0 p}{\omega}}$	$\left(\frac{\omega}{d/0.2\lambda}\right)^3$	C _b	Cal Q _b Tons/day	$\left(\frac{\omega}{d/0.2\lambda}\right)^3$	C _t	Cal Q _t Tons/day	$\left(\frac{\omega}{d/0.2\lambda}\right)^3$	
7	06-08-35	440	355.8	80.77	0.000079	0.81	5.22	0.0013300	-	6	-	VFS	0.000285	0.003	0.023	0.00114	0.010062	0.084044	9.27	7.83	18.86	0.000001	0.4	854.52	0.000053	16.4	2.15
												FS	0.00058	0.197	0.071	0.00232			2.96	3.34	14.12	0.000057	17.4	68.43	0.000274	84.2	1.61
												MS	0.001158	0.6	0.165	0.00463			1.26	1.17	11.39	0.000109	33.6	20.23	0.000194	59.7	1.30
												CS	0.00232	0.18	0.375	0.00928			0.56	0.08	9.26	0.000004	1.3	10.56	0.000005	1.5	1.05
												VCS	0.00464	0.0179	0.707	0.01856			0.30	0	7.89	0	0	7.99	0	0	0
												VFG	0.00926	0.0021	1.225	0.03704			0.17	0	6.86	0	0	6.80	0	0	0
												FG	0.0186	0	1.813	0.07440			0.12	0	6.21	0	0	6.17	0	0	0
												MG	0.0371	0	2.563	0.14840			0.08	0	5.69	0	0	5.69	0	0	0
																					0.000171	52.7	0.000526	161.8			
8	07-08-35	439	354.9	81.32	0.000092	0.84	4.99	0.0014545	-	5	-	VFS	0.000285	0.01	0.023	0.00114	0.011131	0.093977	9.78	8.94	19.12	0.000005	1.5	956.40	0.000240	73.5	1.42
												FS	0.00058	0.185	0.071	0.00232			3.12	3.88	14.32	0.000066	20.3	77.05	0.000355	109.0	1.07
												MS	0.001158	0.56	0.165	0.00463			1.33	1.45	11.55	0.000135	41.3	21.34	0.000249	76.2	0.86
												CS	0.00232	0.205	0.375	0.00928			0.59	0.22	9.38	0.000014	4.2	10.87	0.000016	4.9	0.70
												VCS	0.00464	0.0331	0.707	0.01856			0.31	0	7.99	0	0	8.15	0	0	0
												VFG	0.00926	0.0064	1.225	0.03704			0.18	0	6.95	0	0	6.91	0	0	0
												FG	0.0186	0.0004	1.813	0.07440			0.12	0	6.30	0	0	6.24	0	0	0
												MG	0.0371	0	2.563	0.14840			0.09	0	5.77	0	0	5.77	0	0	0
																					0.000219	67.2	0.000860	263.6			
9	07-08-35	438	357.1	84.42	0.000074	0.82	5.1	0.0025562	-	63	-	VFS	0.000285	0.01	0.023	0.00114	0.012895	0.077252	8.87	10.31	18.65	0.000005	1.6	773.79	0.000218	67.3	14.56
												FS	0.00058	0.26	0.071	0.00232			2.83	4.56	13.97	0.000104	32.0	63.93	0.000474	146.3	10.90
												MS	0.001158	0.5	0.165	0.00463			1.21	1.78	11.27	0.000141	43.5	19.35	0.000242	74.7	8.80
												CS	0.00232	0.105	0.375	0.00928			0.53	0.39	9.15	0.000012	3.6	10.32	0.000013	4.1	7.15
												VCS	0.00464	0.0495	0.707	0.01856			0.28	0	7.80	0	0	7.87	0	0	0
												VFG	0.00926	0.0355	1.225	0.03704			0.16	0	6.78	0	0	6.72	0	0	0
												FG	0.0186	0.025	1.813	0.07440			0.11	0	6.14	0	0	6.11	0	0	0
												MG	0.0371	0.015	2.563	0.14840			0.08	0	5.63	0	0	5.63	0	0	0
																					0.000262	80.7	0.000948	292.3			

ตารางที่ ก-6 ค่าการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนแม่น้ำน่าน (ต่อ)

No	Date	Sta. km	Q_w	W	S_f	V	y	d_m	d	p	ω	τ_c	τ_0	τ_0	$\sqrt{\frac{\tau_0 p}{\omega}}$	$\left(\frac{\tau_0}{\tau_c} - 1\right)$	$\left(\frac{\tau_0}{\tau_c}\right)^3$	\bar{c}_b	$\frac{Cal}{Q_b}$	$\left(\frac{\tau_0}{\tau_c}\right)^3$	\bar{c}_t	$\frac{Cal}{Q_t}$	$\left(\frac{\tau_0}{\tau_c}\right)^3$	$\frac{Cal}{Q_t}$				
			cms	m		m/s	m	ft	ft	fr/s		fr/s	fr/s	fr/s				% (Ob/O)	Tons/day	% (Ob/O)	Tons/day	% (Ob/O)	Tons/day	% (Ob/O)	Tons/day			
									Size class																			
									Q_s	Q_b	Q_t																	
16	27-10-35	438	188.4	84.64	0.00001	0.45	4.9	0.0025562	732	0	732	VFS	0.000285	0.01	0.023	0.00114	0.003955	0.010034	3.20	2.47	14.41	0.000001	0.2	81.78	0.000006	0.9	14506.15	
												FS	0.00058	0.26	0.071	0.00232	1.02	0.70	10.79	0.000013	2.1	16.30	0.000020	3.2	2891.05			
												MS	0.001158	0.5	0.165	0.00463	0.44	0	8.70	0	0	9.36	0	0	0			
												CS	0.00232	0.105	0.375	0.00928	0.19	0	7.07	0	0	7.05	0	0	0			
												VCS	0.00464	0.0495	0.707	0.01856	0.10	0	6.02	0	0	6.02	0	0	0			
												VFG	0.00926	0.0355	1.225	0.03704	0.06	0	5.24	0	0	5.24	0	0	0			
												FG	0.0186	0.025	1.813	0.07440	0.04	0	4.75	0	0	4.75	0	0	0			
												MG	0.0371	0.015	2.563	0.14840	0.03	0	4.35	0	0	4.35	0	0	0			
																		0.000014	2.3	0.000025	4.1	0.000025	4.1	0.000025	4.1			
17	07-12-35	443	368.2	71.62	0.000087	0.85	5.86	0.0020698	3491	17	3508	VFS	0.000285	0.01	0.023	0.00114	0.012342	0.104396	10.31	9.83	19.38	0.000004	1.4	1093.00	0.000249	79.3	4.98	13030.32
												FS	0.00058	0.215	0.071	0.00232	3.29	4.32	14.51	0.000072	22.8	87.15	0.000431	137.0	3.73	1038.92		
												MS	0.001158	0.52	0.165	0.00463	1.41	1.66	11.70	0.000121	38.4	22.49	0.000232	73.8	3.01	268.17		
												CS	0.00232	0.13	0.375	0.00928	0.62	0.33	9.51	0.000011	3.5	11.19	0.000013	4.1	2.45	133.36		
												VCS	0.00464	0.0662	0.707	0.01856	0.33	0	8.10	0	0	8.31	0	0	0			
												VFG	0.00926	0.0388	1.225	0.03704	0.19	0	7.05	0	0	7.02	0	0	0			
												FG	0.0186	0.02	1.813	0.07440	0.13	0	6.38	0	0	6.32	0	0	0			
												MG	0.0371	0	2.563	0.14840	0.09	0	5.85	0	0	5.85	0	0	0			
																		0.000208	66.1	0.000925	294.3	0.000925	294.3	0.000925	294.3			
18	08-12-35	442	332.1	87.81	0.000089	0.74	4.95	0.0029834	3256	64	3320	VFS	0.000285	0.006	0.023	0.00114	0.011189	0.090190	9.58	8.82	19.02	0.000003	0.8	916.58	0.000137	39.3	19.81	13208.80
												FS	0.00058	0.244	0.071	0.00232	3.05	3.82	14.24	0.000086	24.7	73.24	0.000443	127.0	14.83	1055.49		
												MS	0.001158	0.5	0.165	0.00463	1.31	1.42	11.49	0.000118	33.9	20.91	0.000215	61.6	11.96	301.31		
												CS	0.00232	0.115	0.375	0.00928	0.57	0.21	9.33	0.000007	2.1	10.75	0.000008	2.4	9.72	154.91		
												VCS	0.00464	0.05	0.707	0.01856	0.30	0	7.95	0	0	8.09	0	0	0			
												VFG	0.00926	0.04	1.225	0.03704	0.18	0	6.92	0	0	6.87	0	0	0			
												FG	0.0186	0.015	1.813	0.07440	0.12	0	6.27	0	0	6.21	0	0	0			
												MG	0.0371	0.03	2.563	0.14840	0.08	0	5.74	0	0	5.74	0	0	0			
																		0.000214	61.5	0.000803	230.4	0.000803	230.4	0.000803	230.4			

ภาคผนวก ข
รายละเอียดการเก็บตัวอย่างวัสดุตะกอนท้องน้ำ

อุปกรณ์ที่ใช้เก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำในการศึกษาครั้งนี้ คือ เครื่องตักหน้าดิน (Birge-Ekman grab sampler) เป็นอุปกรณ์เก็บผิวหน้าตะกอนดินแบบกล่อง ซึ่งมีลูกตุ้มโลหะ (Messenger) ช่วยในการปิดปากเก็บตะกอน ปากเก็บตะกอนจะมีลักษณะซ้อนเหลื่อมกัน เป็นบานพับที่เปิดปิดได้ง่าย ขณะหย่อนอุปกรณ์ลงในน้ำ น้ำจะสามารถไหลผ่านออกไปได้ และขณะที่ดึงอุปกรณ์ขึ้นจากน้ำ ปากเก็บตะกอนจะปิดสนิท ป้องกันไม่ให้ตะกอนออกไป ทั้งนี้มีโอกาสที่ปากเก็บตะกอนจะปิดไม่สนิท ทำให้ตะกอนถูกชะออกไปได้ หรือในขณะที่ดึงอุปกรณ์ขึ้นจากน้ำ ตะกอนก็อาจถูกชะได้เช่นกัน แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ดังภาพที่ ข-1

สำหรับภาพของบริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำแต่ละสถานี ซึ่งได้แสดงรายละเอียดตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่าไว้ในตารางที่ 2-1 นั้น มีแสดงดังภาพที่ ข-2 ถึง ข-18



ภาพที่ ข-1 เครื่องตักหน้าดิน (Birge-Ekman grab sampler) ที่ใช้ในการสำรวจ



ภาพที่ ข-2 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี P.1



ภาพที่ ข-3 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี P.4A



ภาพที่ ข-4 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี P.15



ภาพที่ ข-5 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี P.21



ภาพที่ ข-6 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี P.75



ภาพที่ ข-7 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี P.77



ภาพที่ ข-8 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี W.1C



ภาพที่ ข-9 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี W.3A



ภาพที่ ข-10 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี W.4A



ภาพที่ ข-11 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี W.23



ภาพที่ ข-12 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี Y.1C



ภาพที่ ข-13 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี Y.6



ภาพที่ ข-14 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี Y.14



ภาพที่ ข-15 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี N.7A



ภาพที่ ข-16 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี N.8A



ภาพที่ ข-17 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี N.40



ภาพที่ ข-18 บริเวณหน้าตัดแม่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุท้องน้ำของสถานี N.60

ภาคผนวก ค

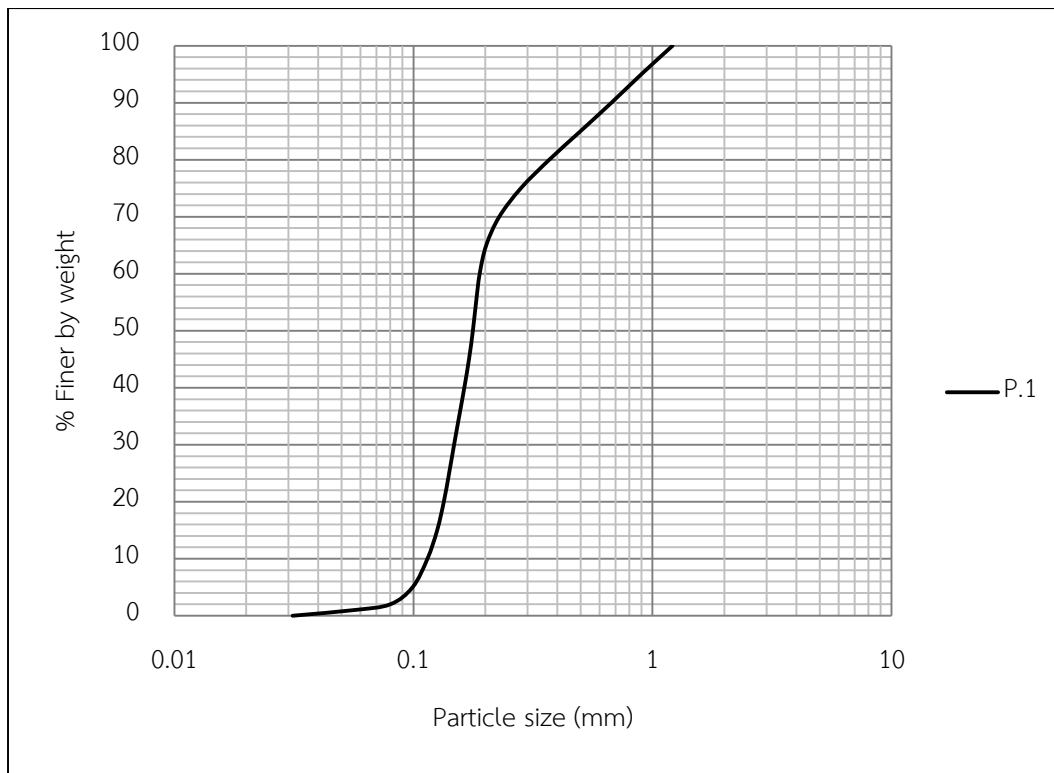
ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดวัสดุตะกอนท้องน้ำ

ในหัวข้อ 4.1.3. ได้แสดงเปอร์เซ็นต์แปรผันของชนิดวัสดุท้องน้ำไว้ทั้งสิ้น 8 ช่วงขนาดตะกอน ซึ่งเป็นการจำแนกขนาดตะกอนที่เรียกว่า Wentworth grade scale วิธีจำแนกนี้นิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเปรียบเทียบได้ทั้งขนาดที่เป็นหน่วยเมตริก หน่วยฟี (Phi, ϕ) และได้กำหนดชื่อให้เรียก แสดงรายละเอียดดังตารางที่ ค-1 สำหรับค่าความเร็วการตกของเม็ดวัสดุ (ω) ที่ใช้ในการศึกษา นี้ เป็นค่า ณ อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส

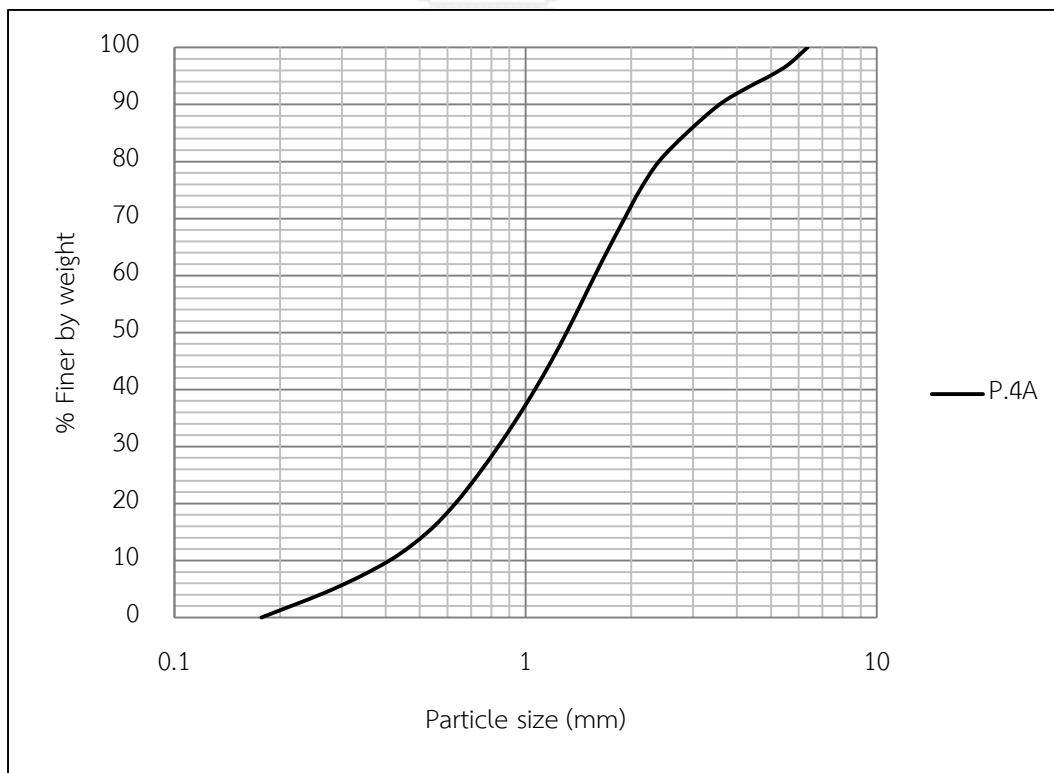
ตารางที่ ค-1 การจำแนกขนาดตะกอน

Size Terms	ตัวย่อ	ชื่อเรียก	ช่วงขนาดตะกอน	ขนาดเฉลี่ย (d)		ω
				Geometric Mean Size		
			มม.	มม.	ฟุต	ฟุต/วินาที
Coarse Silt	-	ทรายแป้งขนาดหยาบ	0.031 – 0.0625	0.044	0.000144	0.00692
Very Fine Sand	VFS	ทรายขนาดละเอียดมาก	0.0625 – 0.125	0.088	0.000289	0.0236
Fine Sand	FS	ทรายขนาดละเอียด	0.125 – 0.250	0.177	0.000581	0.0724
Medium Sand	MS	ทรายขนาดปานกลาง	0.250 – 0.500	0.354	0.00116	0.173
Coarse Sand	CS	ทรายขนาดหยาบ	0.500 – 1.00	0.707	0.00232	0.387
Very Coarse Sand	VCS	ทรายขนาดหยาบมาก	1.00 – 2.00	1.414	0.00464	0.719
Very Fine Granules	VFG	กรวดขนาดละเอียดมาก	2.00 – 4.00	2.828	0.00928	1.23
Fine Granules	FG	กรวดขนาดละเอียด	4.00 – 8.00	5.657	0.0186	1.81

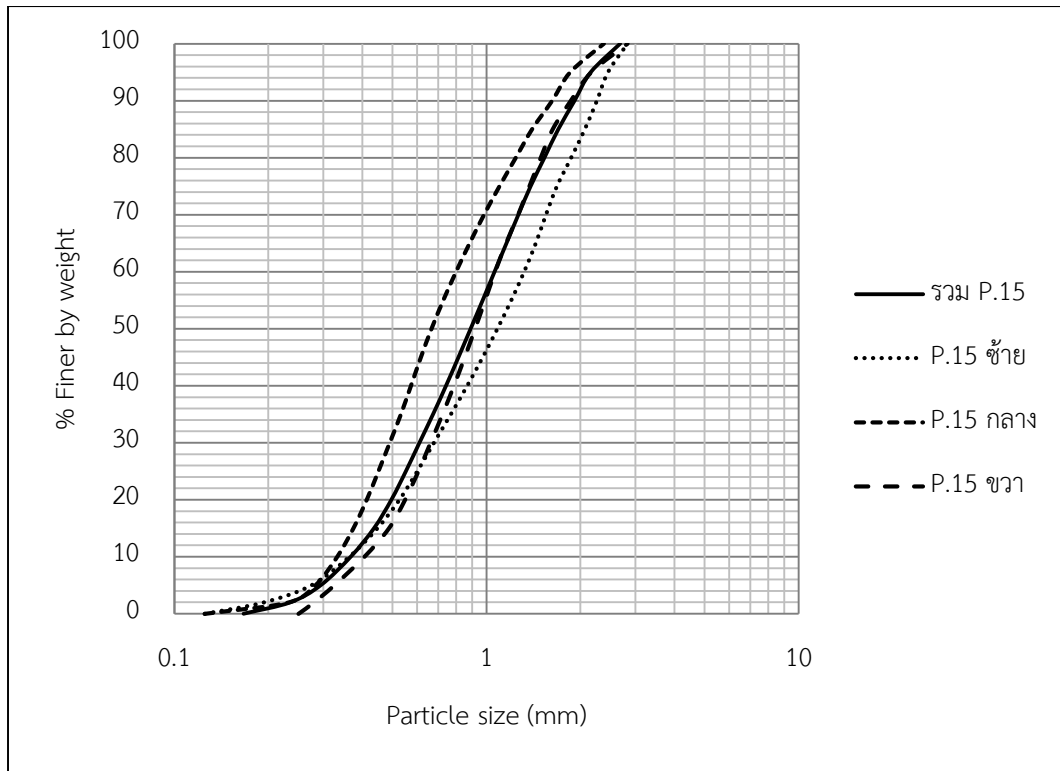
สำหรับผลวิเคราะห์การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำของแต่ละตัวอย่างที่เก็บมาทั้งสิ้น 35 ชุด ตัวอย่าง จาก 17 หน้าตัดแม่น้ำ ซึ่งได้สรุปคุณสมบัติตัวอย่างวัสดุท้องน้ำไว้ในตารางที่ 4-2 ได้แสดงผลการวิเคราะห์แต่ละตัวอย่างดังรูป ค-1 ถึง ค-17



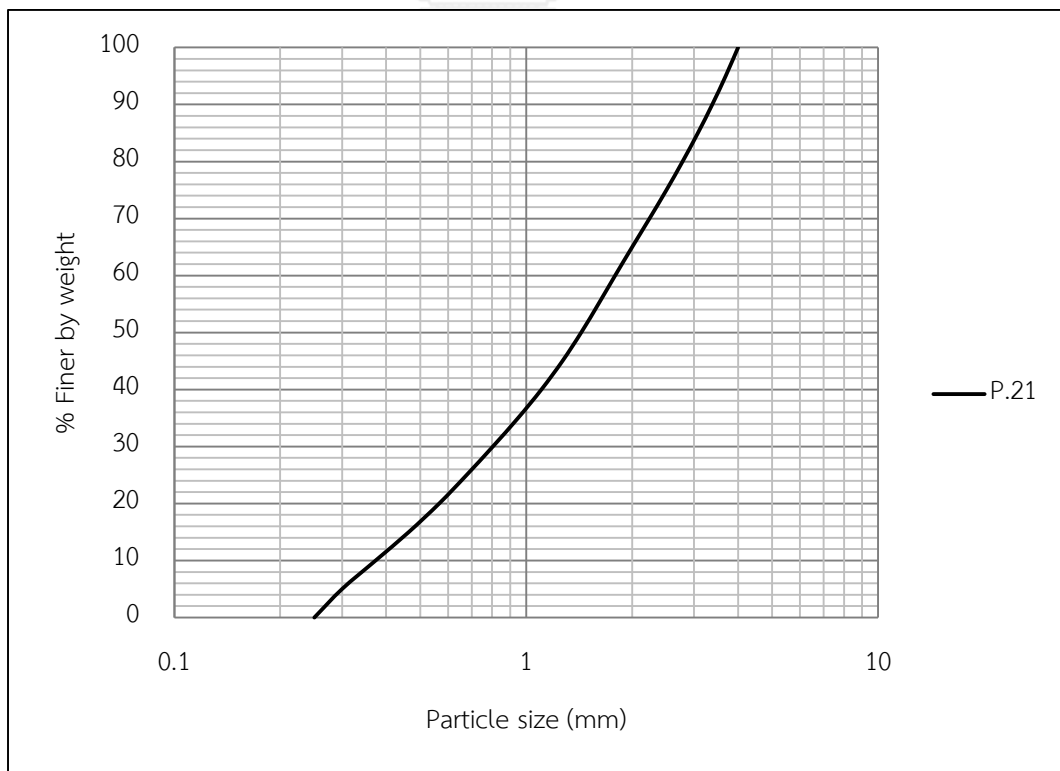
รูปที่ ค-1 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี P.1



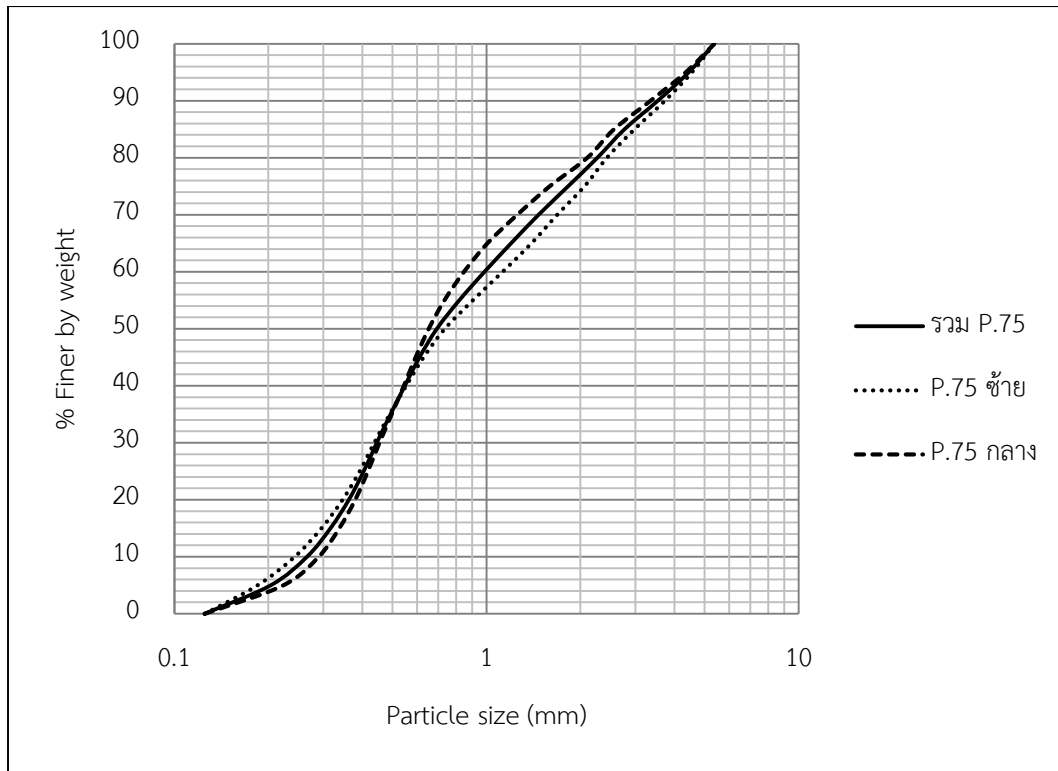
รูปที่ ค-2 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี P.4A



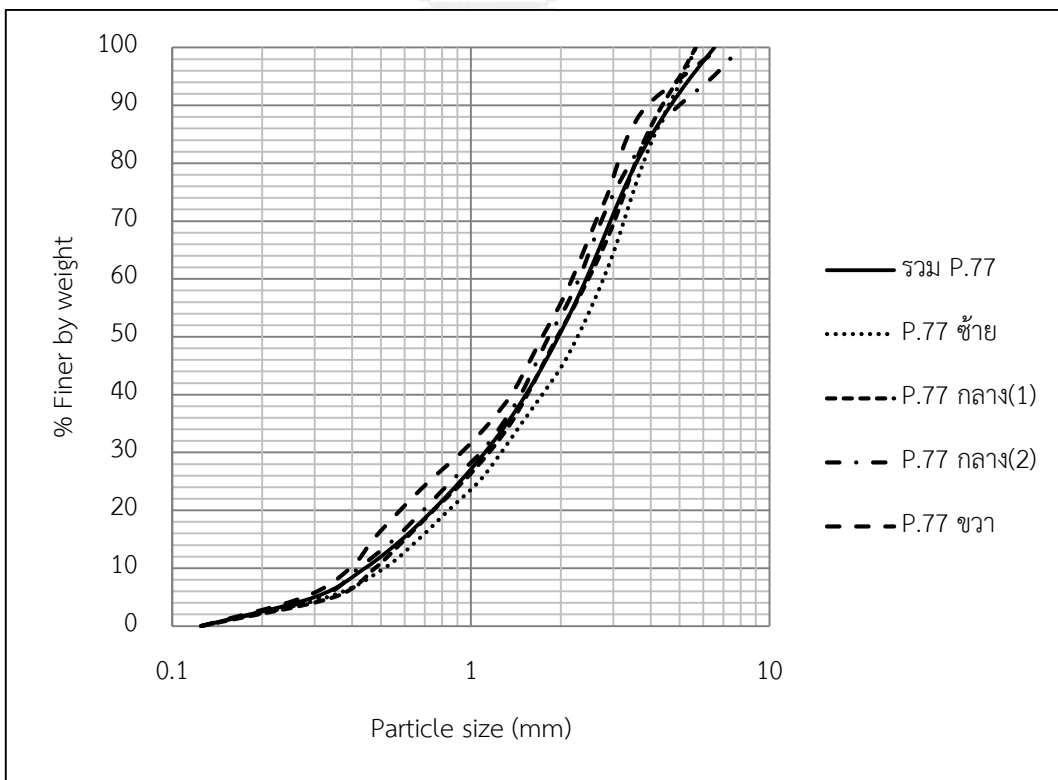
รูปที่ ค-3 การกระจายขนาดวัสดุท้องถิ่น ของหน้าตัดสถานี P.15



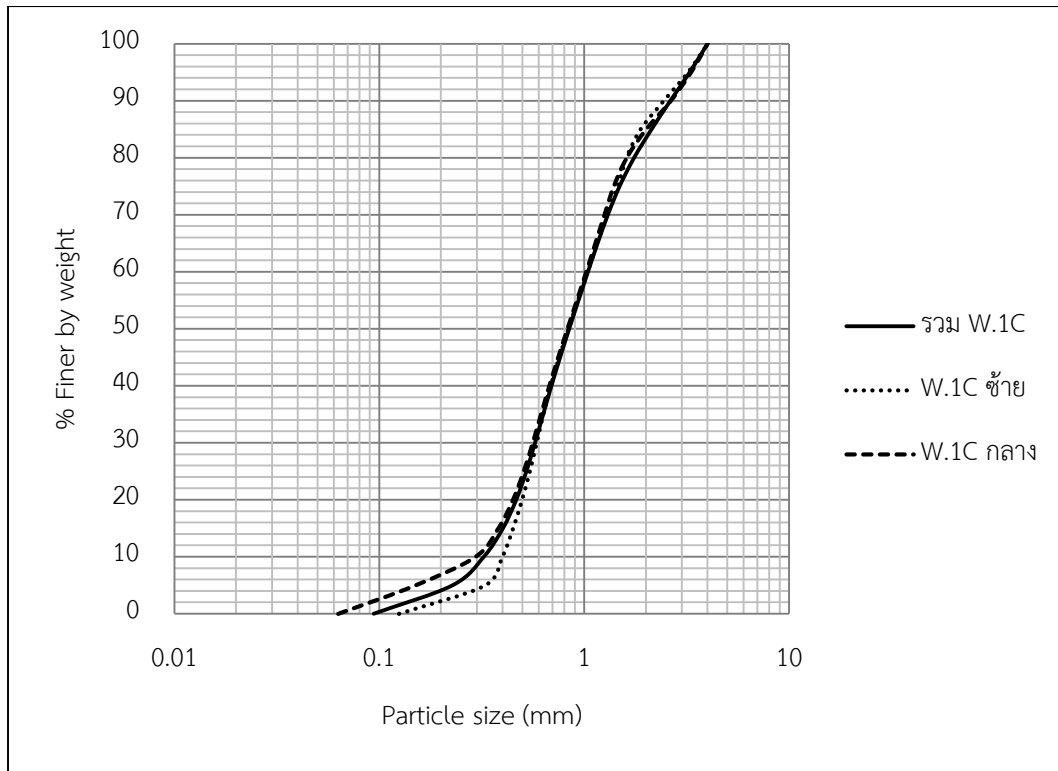
รูปที่ ค-4 การกระจายขนาดวัสดุท้องถิ่น ของหน้าตัดสถานี P.21



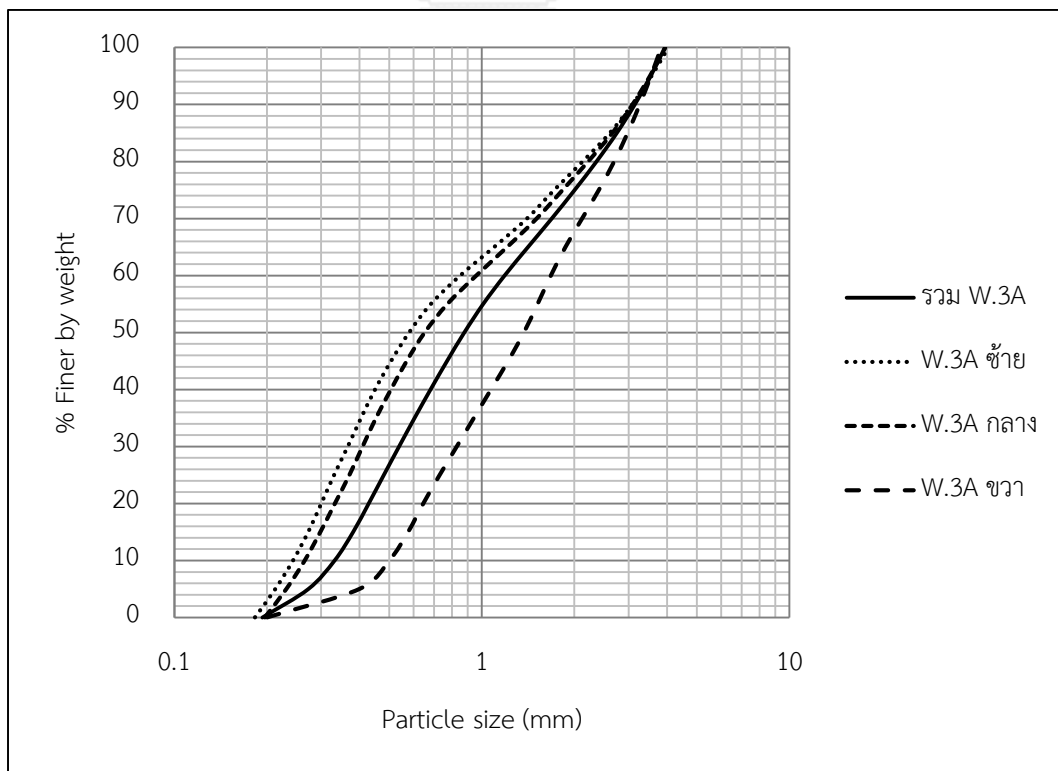
รูปที่ ค-5 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี P.75



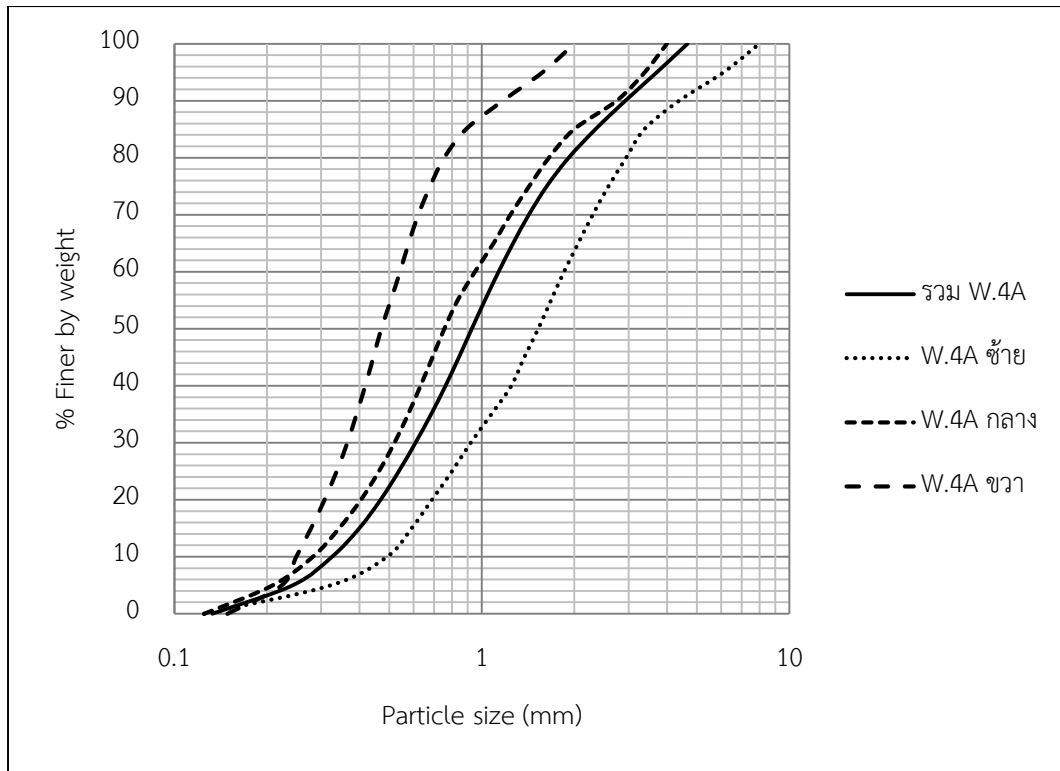
รูปที่ ค-6 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี P.77



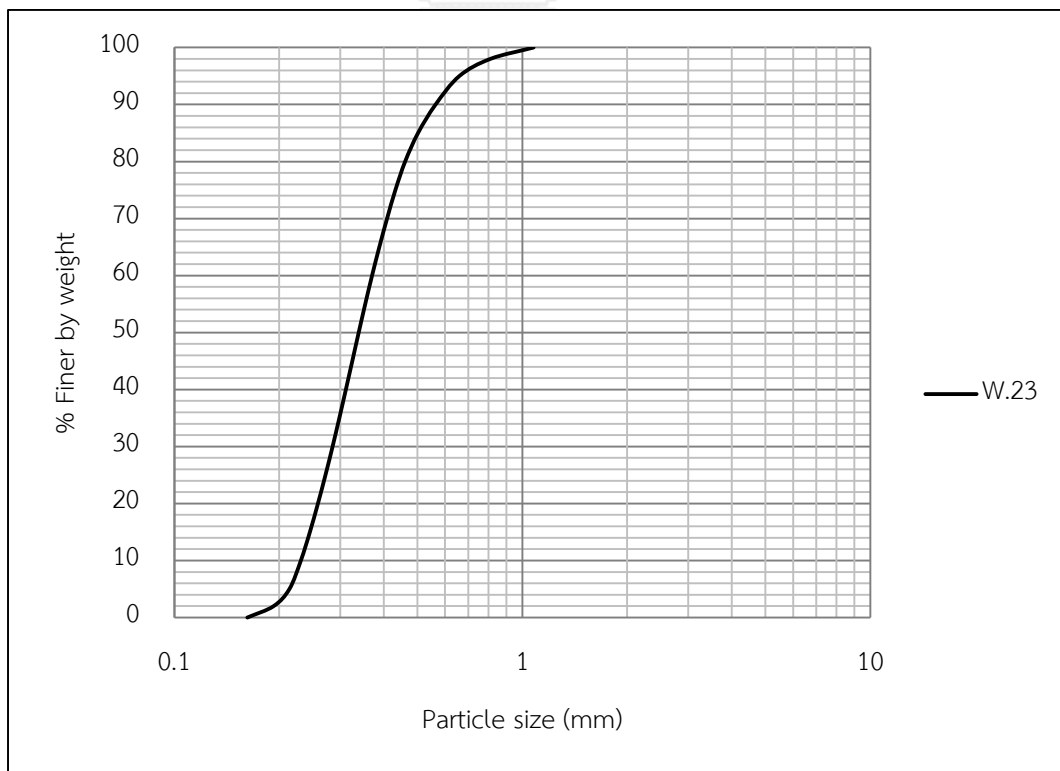
รูปที่ ค-7 การกระจายขนาดวัสดุท้องถิ่น ของหน้าตัดสถานี W.1C



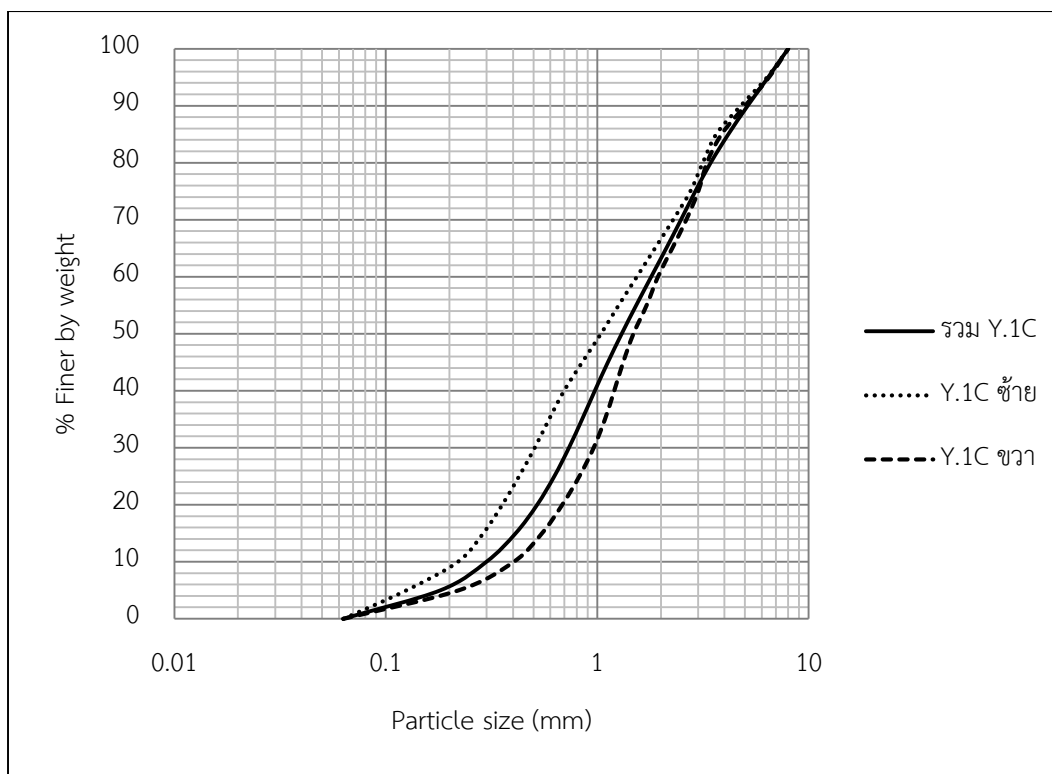
รูปที่ ค-8 การกระจายขนาดวัสดุท้องถิ่น ของหน้าตัดสถานี W.3A



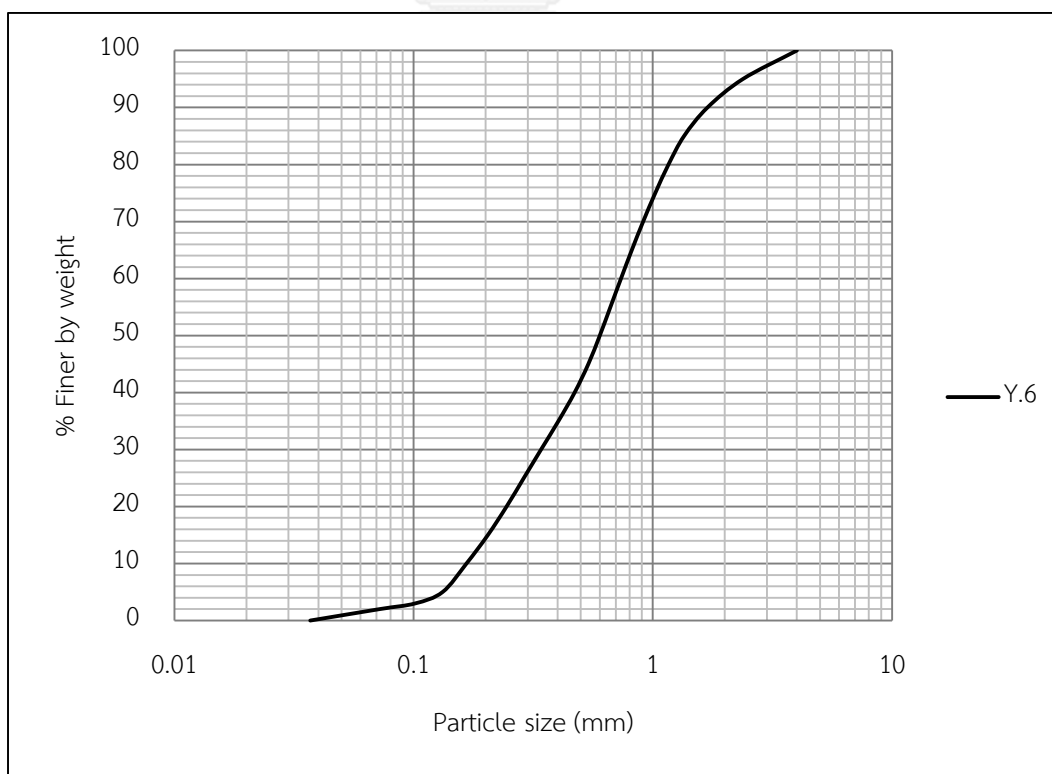
รูปที่ ค-9 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี W.4A



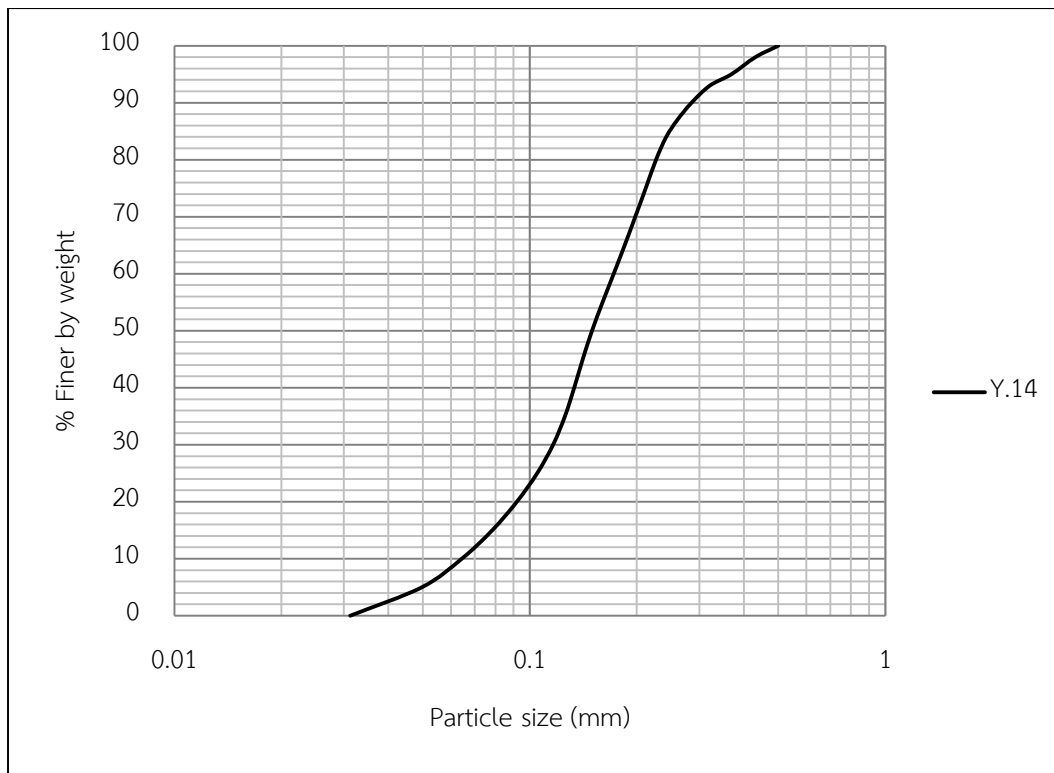
รูปที่ ค-10 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี W.23



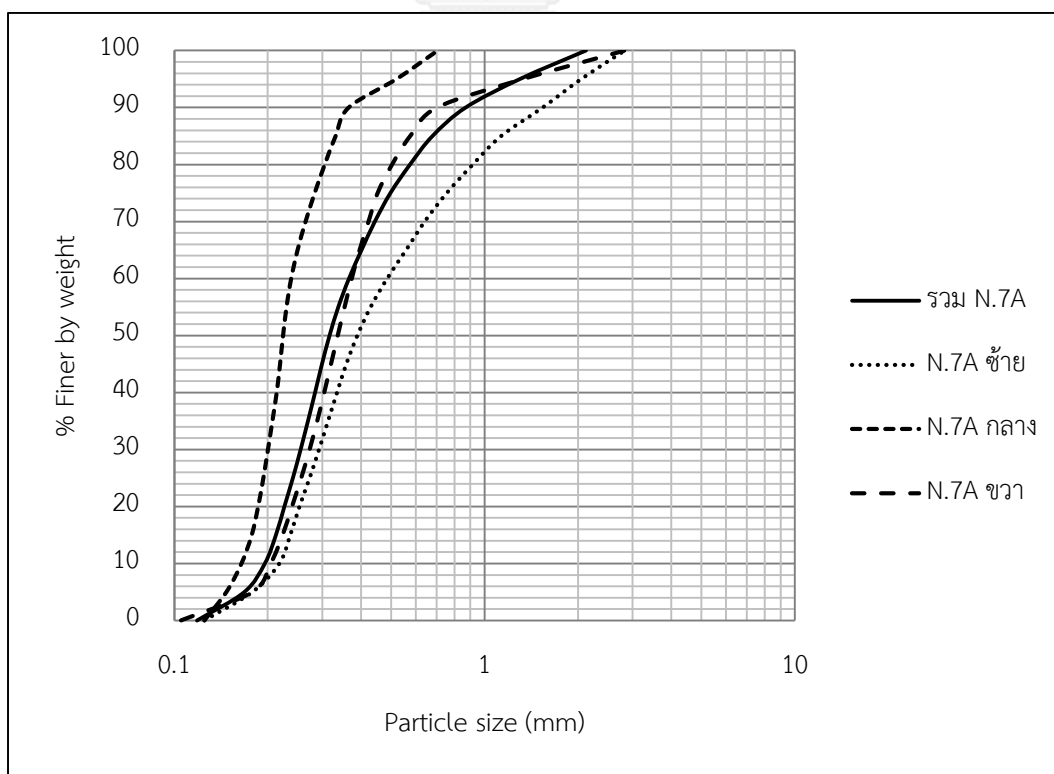
รูปที่ ค-11 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี Y.1C



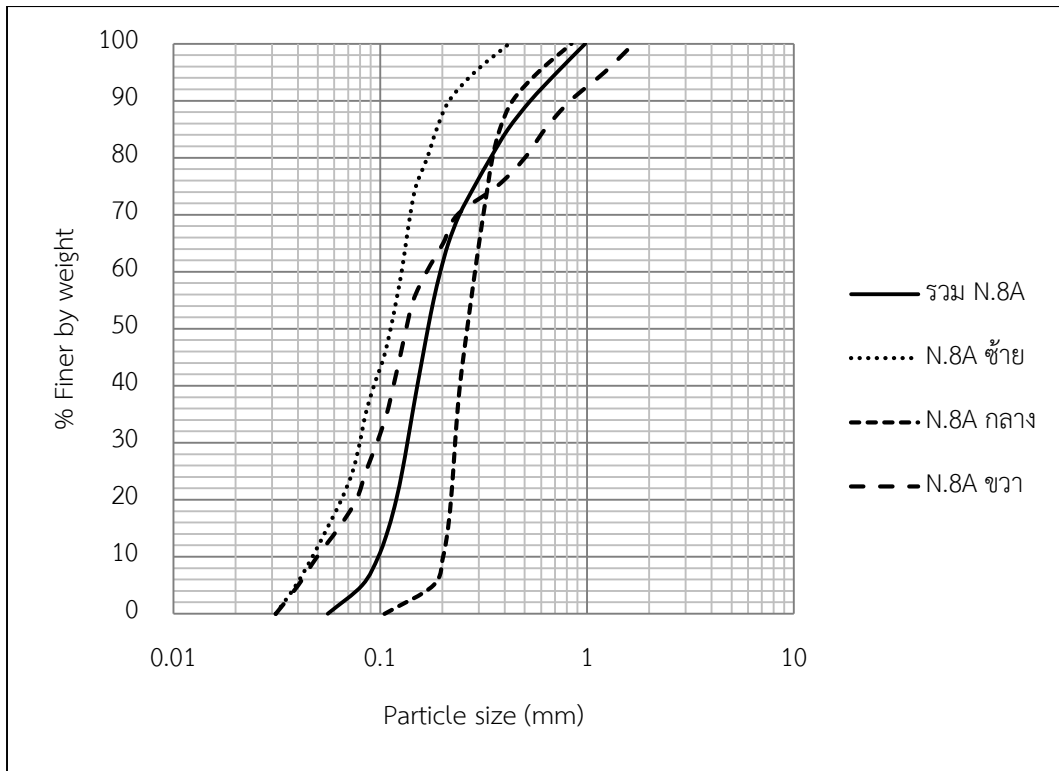
รูปที่ ค-12 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี Y.6



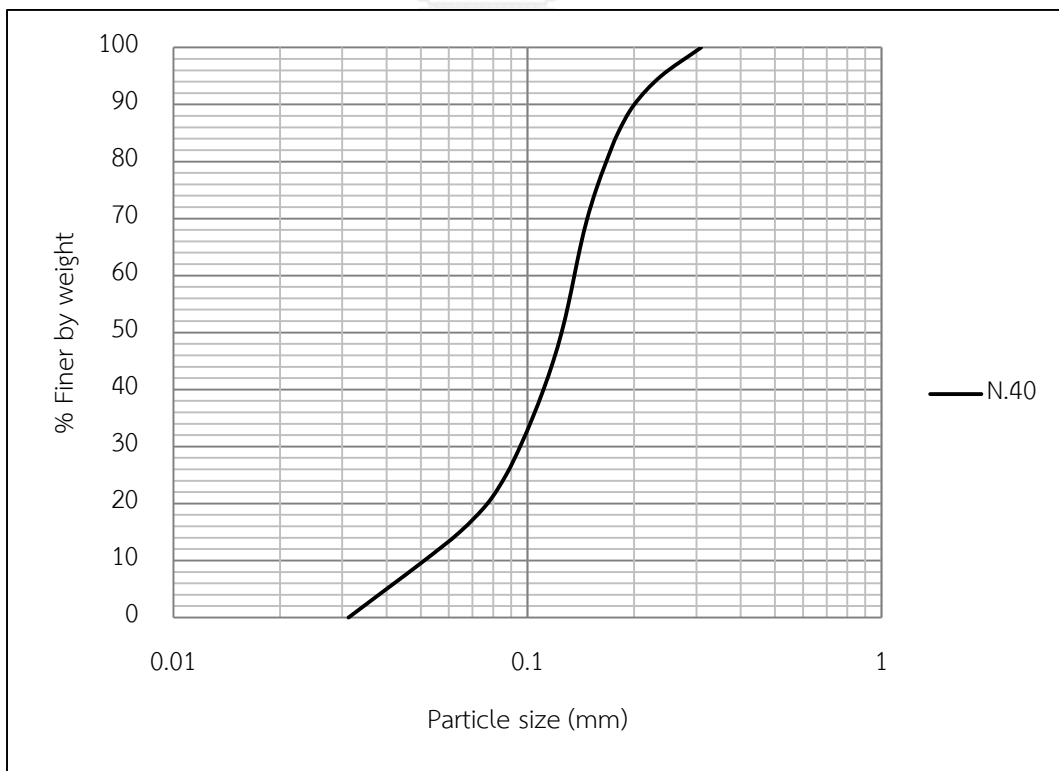
รูปที่ ค-13 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี Y.14



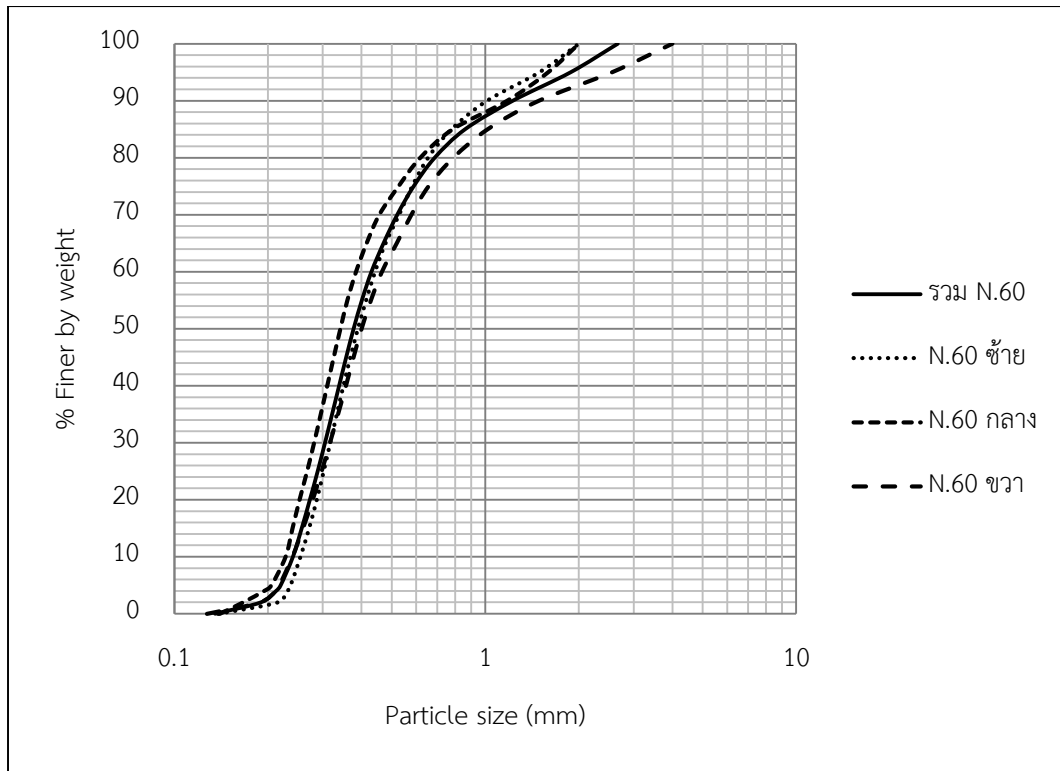
รูปที่ ค-14 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี N.7A



รูปที่ ค-15 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี N.8A



รูปที่ ค-16 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี N.40



รูปที่ ค-17 การกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ ของหน้าตัดสถานี N.60

ภาคผนวก ง
คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของสถานีวัดน้ำ

รูปตัดขวางลำน้ำ ของสถานีสำรวจอุทกวิทยา 15 สถานี ซึ่งทำการสำรวจโดยกรมชลประทาน แบ่งเป็นสถานีในกลุ่มน้ำปิง 4 สถานี (P.1, P.4A, P.75, P.77), กลุ่มน้ำวัง 4 สถานี (W.1C, W.3A, W.4A, W.23), กลุ่มน้ำยม 3 สถานี (Y.1C, Y.6, Y.14) และกลุ่มน้ำน่าน 4 สถานี (N.7A, N.8A, N.40, N.60) แสดงดังรูปที่ ง-1 ถึง ง-4

แสดงรูปตัดตามยาวลำน้ำแม่น้ำปิง¹ แม่น้ำวัง² แม่น้ำยม³ และแม่น้ำน่าน⁴ ดังรูปที่ ง-5, ง-6, ง-7 และ ง-8 ตามลำดับ

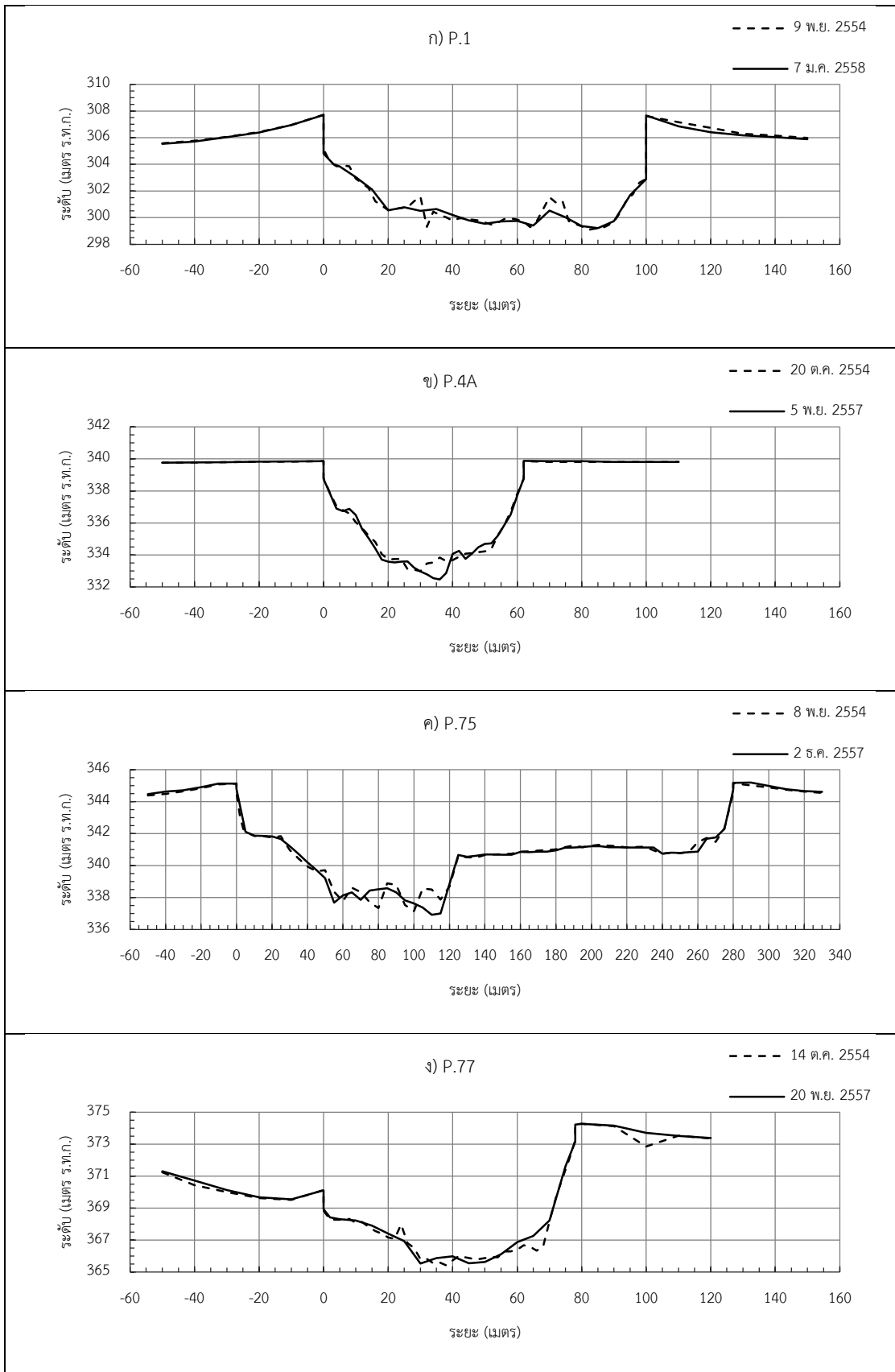


¹ คณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, สำนักงาน. งานศึกษาข้อมูลและศักยภาพการพัฒนาแม่น้ำแม่ปิง : รายงานฉบับสุดท้าย / เสนอโดย บริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ จำกัด. กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2537. หน้า 2-13.

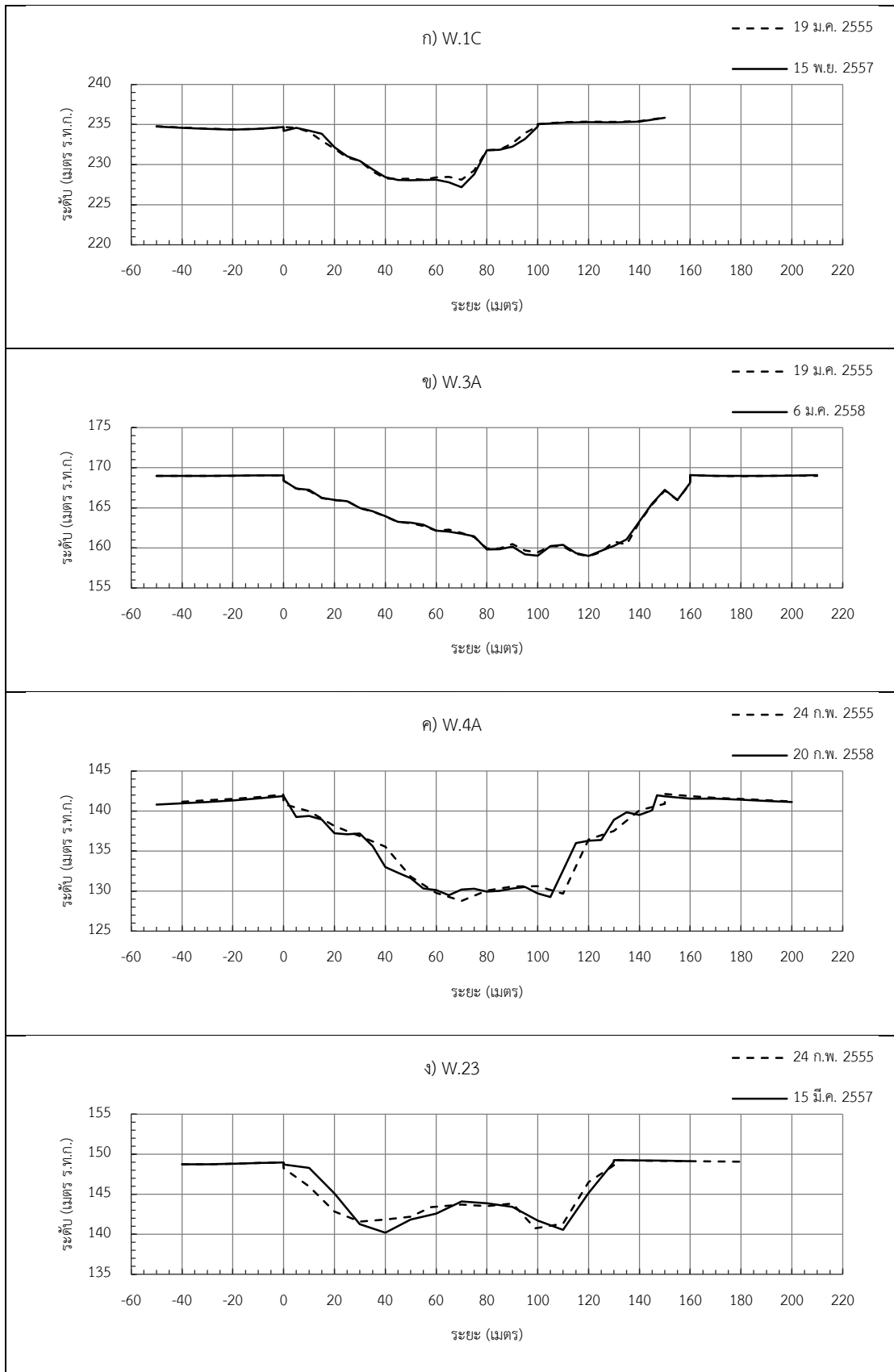
² คณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, สำนักงาน. งานศึกษาข้อมูลและศักยภาพการพัฒนาแม่น้ำวัง : รายงานฉบับสุดท้าย / เสนอโดย บริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ จำกัด. กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2537. หน้า 2-11.

³ คณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, สำนักงาน. งานศึกษาข้อมูลและศักยภาพการพัฒนาแม่น้ำยม : รายงานฉบับสุดท้าย / เสนอโดย บริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ จำกัด. กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2537. หน้า 2-10.

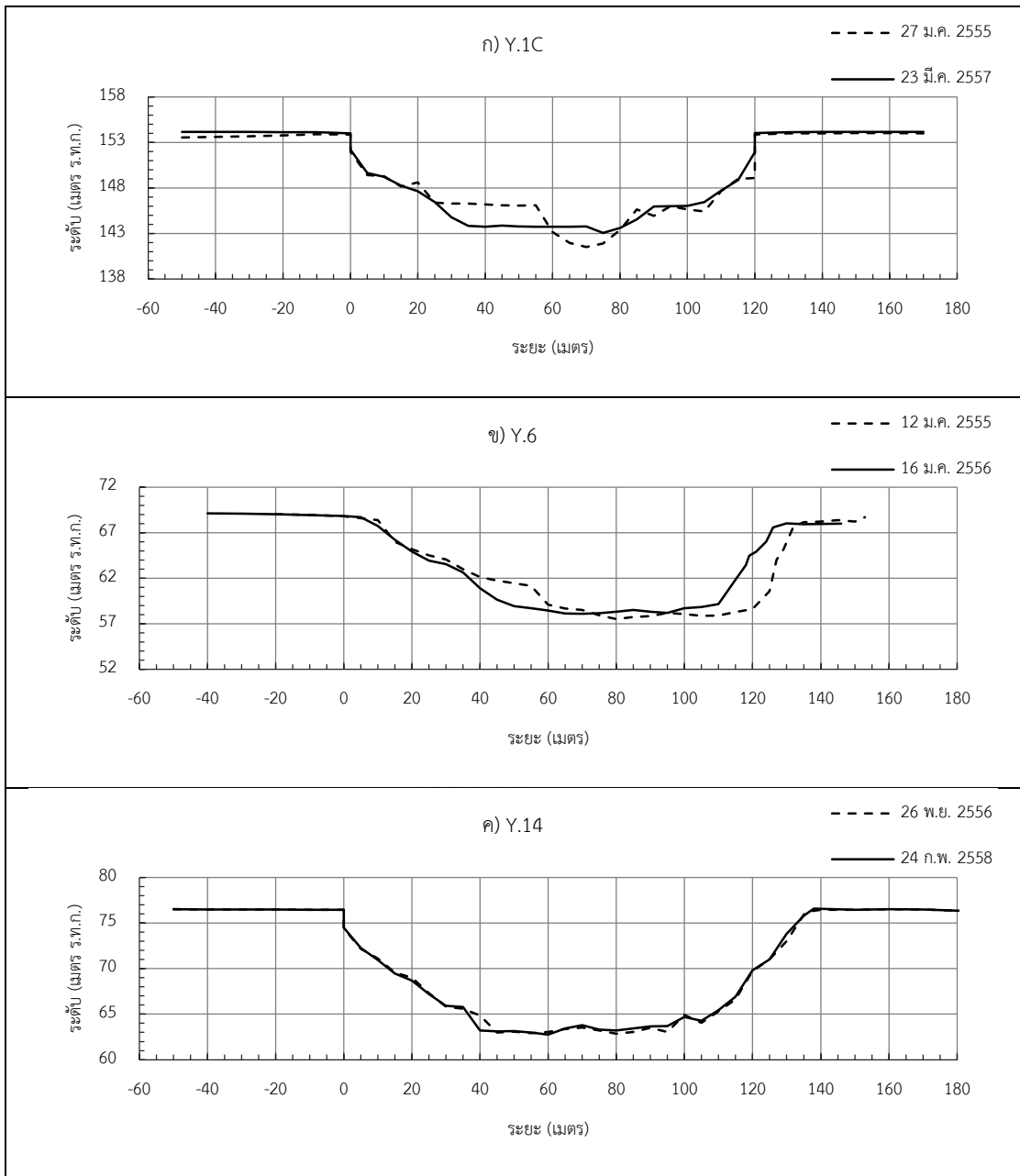
⁴ คณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, สำนักงาน. งานศึกษาข้อมูลและศักยภาพการพัฒนาแม่น้ำน่าน : รายงานฉบับสุดท้าย / เสนอโดย บริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ จำกัด. กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2537. หน้า 2-9.



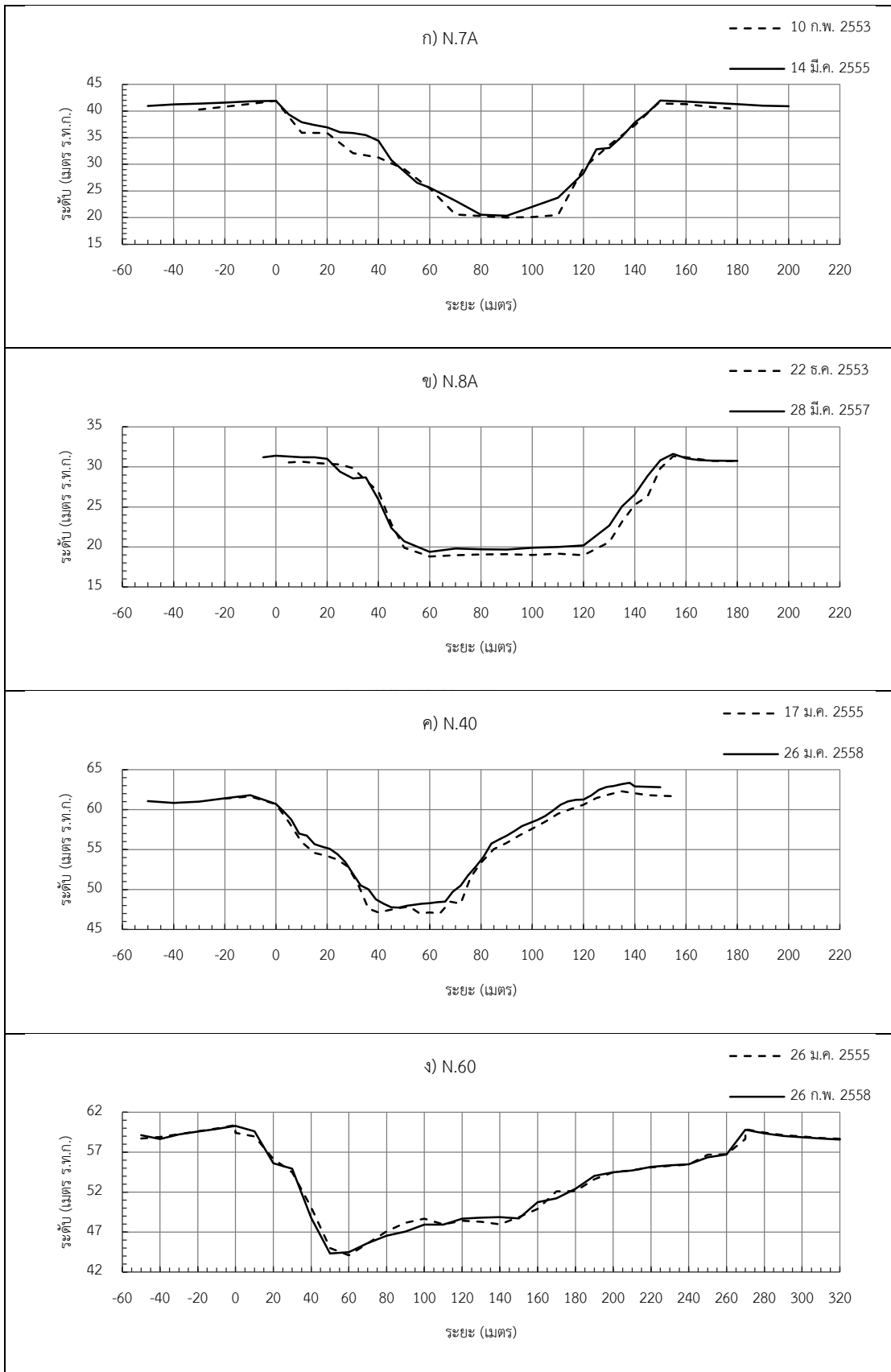
รูปที่ ง-1 รูปตัดขวางลำน้ำ ของสถานีในกลุ่มน้ำปิง



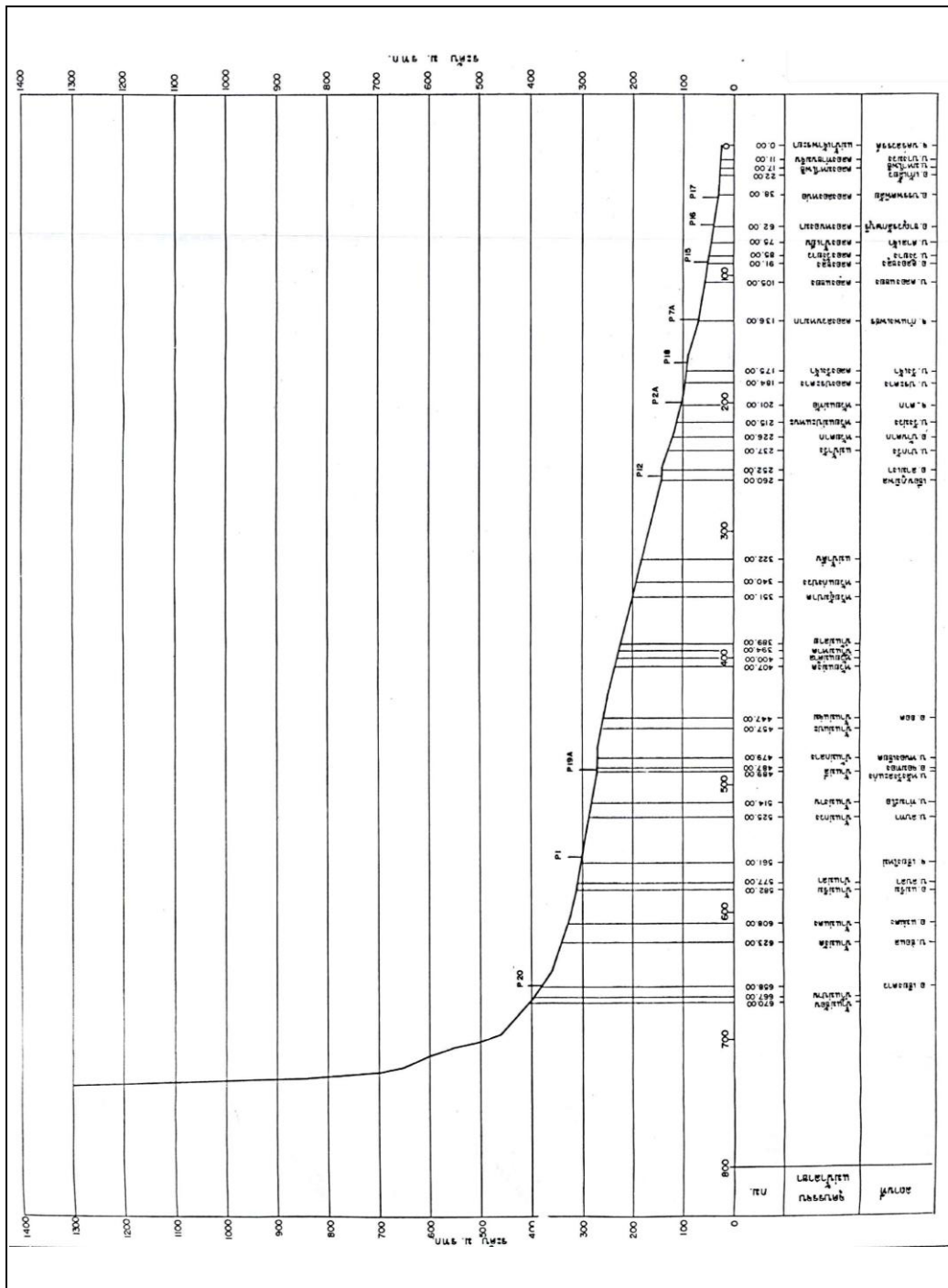
รูปที่ ง-2 รูปตัดขวางลำน้ำ ของสถานีในกลุ่มน้ำวัง



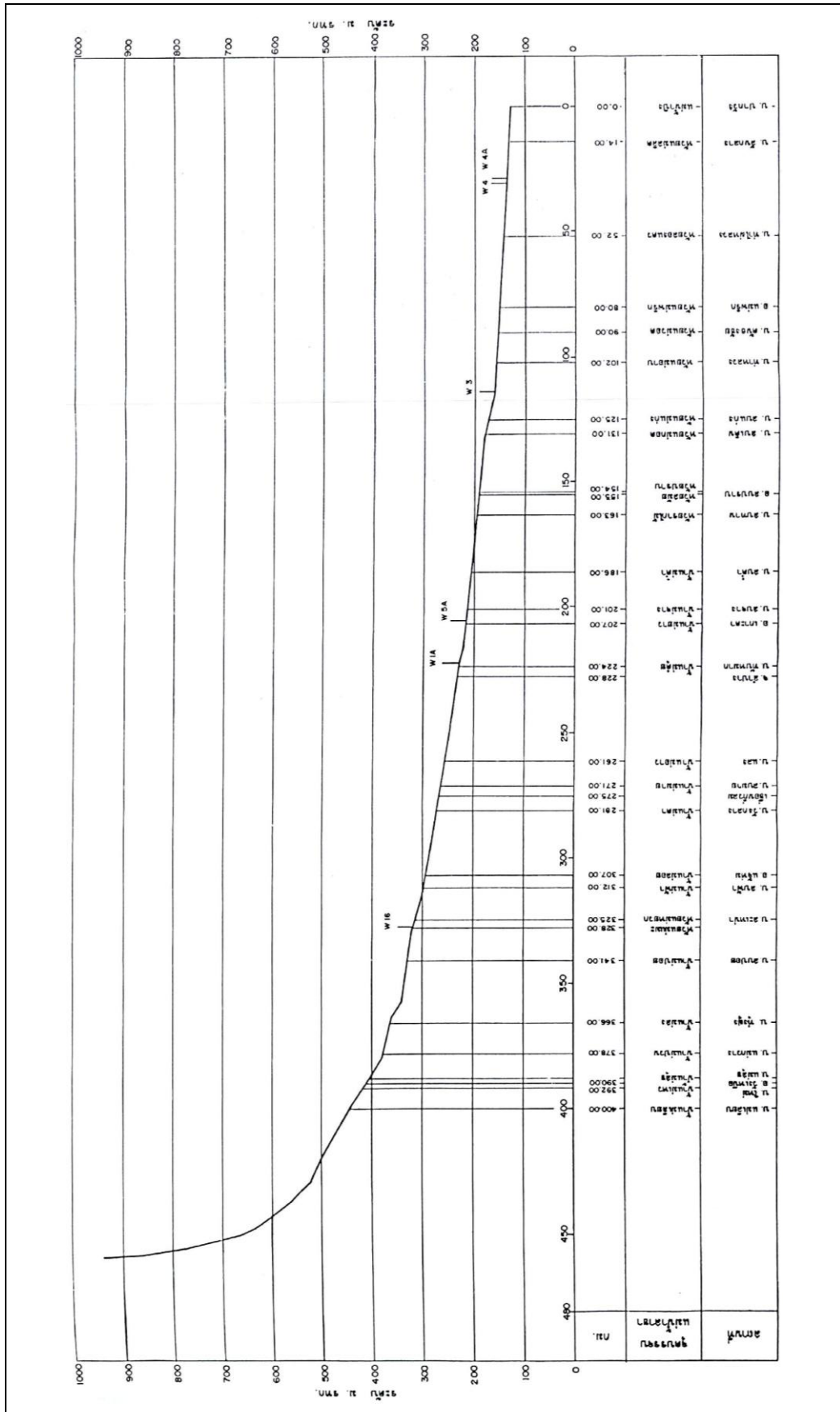
รูปที่ ง-3 รูปตัดขวางลำน้ำ ของสถานีในกลุ่มน้ำยม



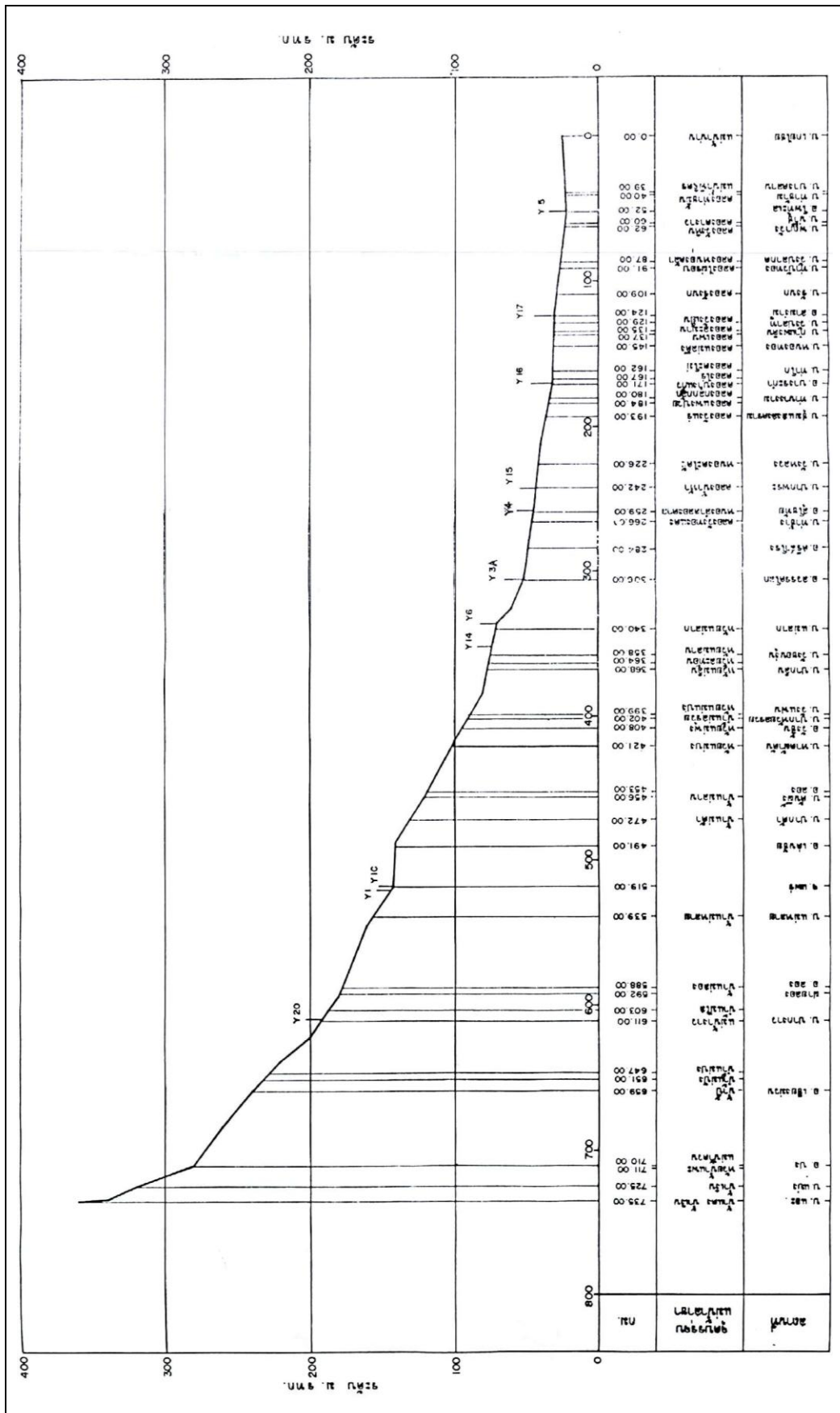
รูปที่ ๔-4 รูปตัดขวางลำน้ำ ของสถานีในลุ่มน้ำน่าน



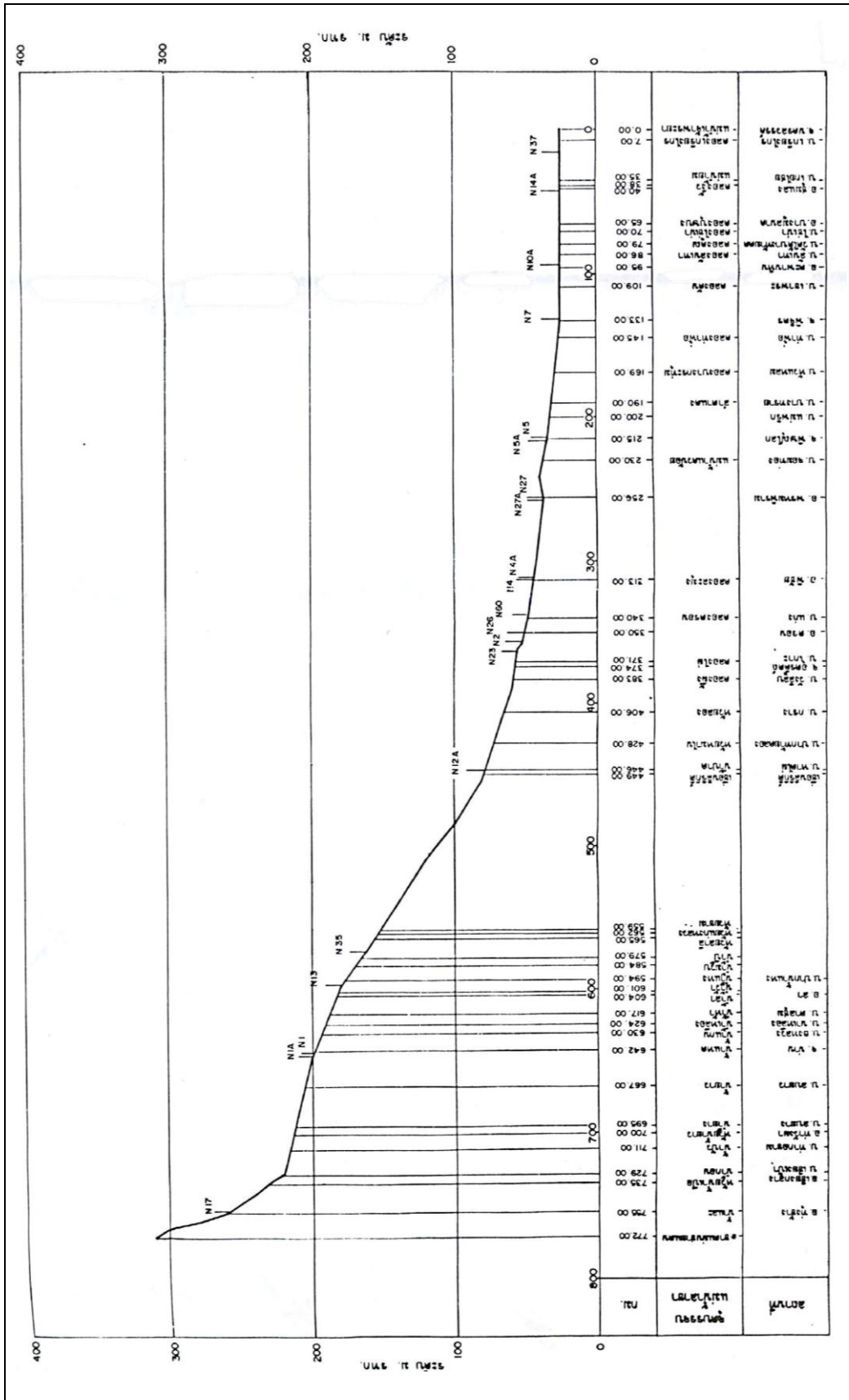
รูปที่ ๕-5 ระบุตัดตามยาวลำน้ำแม่ปาง



รูปที่ ง-6 รูปตัดตามยาวสถานีแม่แก้ว



รูปที่ ๖-๗ รูปตัดตามยาวสถานี ๖๖+๐๐ ถึง ๖๖+๕๐๐



รูปที่ ๖-๘ รูปตัดตามยาวลำน้ำแม่ไม้

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกนกพร เลิศเดชาภัทร (Miss Kanokporn Lertdechapat)

เกิดเมื่อวันที่ 8 มิถุนายน พ.ศ.2535

สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร

วุฒิการศึกษา

- วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (วศ.บ. สิ่งแวดล้อม)
สำเร็จการศึกษาปี พ.ศ. 2557

- วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เข้ารับการศึกษาปี
พ.ศ. 2557

ทุนการศึกษา

- ทุนอุดหนุนการวิจัย "ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย" กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

ผลงานทางวิชาการ

- บทความเรื่อง “อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย” ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งชาติ ครั้งที่ 6 วันที่ 5-7 สิงหาคม 2558 ณ โรงแรมเซ็นทารา ไฮเดิ้ล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี

- บทความเรื่อง “ลักษณะของวัสดุท้องน้ำ และการประเมินอัตราการเคลื่อนที่ตะกอนแขวนลอยของแม่น้ำในภาคเหนือของประเทศไทย” ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 วันที่ 28-30 มิถุนายน 2559 ณ โรงแรม บีพี สมิทลา บีช สงขลา จ.สงขลา