ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)

ปริญญา

วิศวกรรมชลประทาน	วิศวกรรมชลประทาน
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสักโดยใช้แบบจำลอง MIKE21

A Study of Sediment Transport in Pasak River Using MIKE 21 Model

นามผู้วิจัย นายอรรถพร พวงผิว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(อาจารย์วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ, วศ.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(อาจารย์ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์, วศ.ด.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิมิตร เฉิดฉันท์พิพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน .... เดือน .... พ.ศ ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสักโดยใช้แบบจำลอง MIKE21

A Study of Sediment Transport in Pasak River Using MIKE21 Model

โดย

นายอรรถพร พวงผิว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)
พ.ศ. 2558

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อรรถพร พวงผิว 2558: การศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสักโดยใช้แบบจำลอง MIKE21 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน) สาขาวิศวกรรมชลประทาน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วิบูวัฒก์ แต้สมบัติ, วศ.ด. 211 หน้า

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาพทางอุทกพลศาสตร์และการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสักตั้งแต่ท้ายเขื่อนพระราม 6 จนถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยา โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD/ST เริ่มต้นจากการรวบรวมข้อมูลรูปตัดลำน้ำ ข้อมูลปริมาณการไหล ข้อมูลระดับน้ำ และข้อมูลตะกอนในแม่น้ำป่าสักในช่วงปี พ.ศ. 2556-2557 สำหรับผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์ MIKE21-HD ในแม่น้ำป่าสัก พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning’n ทั้งลำน้ำมีค่าเท่ากับ 0.0286 ซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณระดับน้ำใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจริงที่สถานีนครหลวง โดยจะให้ค่าดัชนีทางสถิติ R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.82 และ 0.18 m ตามลำดับ ต่อมาทำการปรับเทียบแบบจำลอง MIKE21-ST ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-HD โดยใช้การไหลแบบคงที่ในช่วงอัตราการไหล 100 ถึง 750 m^3/s และใช้ค่าตะกอนที่ตรวจวัดได้ตลอดลำน้ำ จำนวน 4 แห่ง ซึ่งพบว่า มีค่าขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.12 mm ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ยเท่ากับ 2,650 kg/m^3 ค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.4 และความเร็วของการตกตะกอน เท่ากับ 0.0109 m/s ผลการปรับเทียบพบว่า การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำมีอัตราการตกตะกอนอยู่ในช่วง 0.66 ถึง 0.95 m/yr และอัตราการตกตะกอนจะแปรผันตามอัตราการไหล ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลวิเคราะห์จากแบบจำลองกายภาพ หลังจากนั้น แบบจำลอง MIKE21-HD/ST ได้ถูกประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์อัตราการตกตะกอนรายปีในช่วงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550-2555 โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ 1) กรณีเงื่อนไขขอบเขตเป็นการไหลคงที่ตามเวลา และ 2) กรณีเงื่อนไขขอบเขตเป็นการไหลไม่คงที่ตามเวลา ผลการศึกษาพบว่า กรณีที่ 1 อัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.76 m/yr ส่วนกรณีที่ 2 อัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.22 m/yr จะเห็นว่าการไหลแบบคงที่ตามเวลา จะให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลาโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 29 เนื่องจากการจำลองการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลาจะมีความใกล้เคียงกับสภาพการไหลจริงในแม่น้ำป่าสักมากกว่า อย่างไรก็ตามอัตราการตกตะกอนที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้นจะยังมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้เพราะปริมาณตะกอนที่ใช้ในแบบจำลองใช้เป็นค่าเฉลี่ยตลอดช่วงแม่น้ำ แต่ในความเป็นจริงปริมาณตะกอนจะมีความผันแปรไม่เท่ากันในแต่ละเดือนและในแต่ละช่วงลำน้ำ

________________________ ________________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Autthaporn Puangpiw 2015: A Study of Sediment Transport in Pasak River Using MIKE21 Model. Master of Engineering (Irrigation Engineering), Major Field: Irrigation Engineering, Department of Irrigation Engineering. Thesis Advisor: Mr. Wisuwat Taesombat, D.Eng. 211 pages.

The purpose of this study is to simulate the hydrodynamic and sediment transport conditions in Pasak river between a downstream portion of Rama XI dam and a confluence of Chao Phraya river by an application of MIKE21-HD/ST model. First, observed data of river cross section, discharge, water level, and sediment in Pasak river were collected during year 2013-2014. The result of calibration and verification of MIKE21-HD along Pasak river found that the Manning'n roughness coefficient for the whole river is equal to 0.0286, which gave the calculated water level close to the observed values at Nakhon Luang station. It provides statistical index of R^2 and RMSE equal to 0.82 and 0.18 m, respectively. The MIKE21-ST in conjugate with MIKE21-HD models were calibrated using steady state condition in the range of discharge between 100 to 750 m^3/s and measured soil sediment in four places along the river. It found that the average grain size was around 0.12 mm, unit weight of sediment equal to 2,650 kg/m, average porosity equal to 0.4, and settling velocity equal to 0.0109 m/s. The calibration results showed that the rate of bed level change has a sedimentation rate in the range of 0.66 to 0.95 m/yr and the sedimentation rate is directly proportional to the flow rate which corresponds to the results analyzed by the physical model. Finally, MIKE21-HD/ST model was applied to analyze the annual sedimentation rate during year 2007-2012 by dividing into two case studies namely 1) steady flow boundary condition and 2) unsteady flow boundary condition. The result showed that case 1 the average annual sedimentation rate is around 0.76 m/yr while case 2 the average rate is around 0.22 m/yr. It will be seen that the sedimentation rate of steady flow is more than unsteady flow conditions on average approximately 29%. Since unsteady flow model simulation is more similar to the real flow condition in Pasak river. However, sedimentation rate obtained from mathematical models are significantly higher than the actual because of sediment load input to the model was an average throughout the river. In the fact that sediment load varies unequal both in each month and section of the river.

________________________ ________________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

อาจารย์ ดร.วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ช่วยแก้ปัญหา ช่วยเหลือในการวางแผนงาน และสร้างแนวทางในก ารศึกษาวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้ คำปรึกษาแนะนำตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ และให้กำลังใจ แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จ อาจารย์ ดร.ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รอง ที่ให้โอกาสในการศึกษ า คำปรึกษาด้านวิชากา ร และให้คำปรึกษาแนะนำตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆผศ.ดร.สมชาย ดอนเจดีย์ ประธานการสอบ และกรุณา ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ คอยสอบถามความก้าวหน้าวิทยานิพนธ์ และ ดร.ธเนศร์ สมบูรณ์ ผู้ทรงคุณทรงวุฒิภายนอก ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ คอยช่วยเหลือเรื่องต่างๆเป็นอย่างดีขอขอบใจน้องๆ และเพื่อนทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน อนึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ไม่ได้ถ้าขาด ข้อมูลที่ดี ขอขอบคุณกรมชลประทาน และกรมเจ้าท่า ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับ คุณพ่อสุชาติ คุณแม่จริยา และคุณยายสุทิน รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา ตลอดจนญาติพี่น้องเพื่อนฝูงที่ให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนสำเร็จการศึกษาเป็นมหาบัณฑิตได้ด้วยดี

อรรถพร พวงผิว

พฤษภาคม 2558

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	66
อุปกรณ์	66
วิธีการ	67
ผลและวิจารณ์	76
ผล	76
วิจารณ์	91
สรุปและข้อเสนอแนะ	93
สรุป	93
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก ข้อมูลปริมาณการไหล และระดับน้ำของสถานีต่างๆ	100
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลอนุกรมเวลา สำหรับการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน MIKE21-HD/ST	158
ภาคผนวก ค ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลอนุกรมเวลา (Time series)	161
ภาคผนวก ง ขั้นตอนการสร้าง Mesh จากข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำ	174
ภาคผนวก จ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE21-HD	180
ภาคผนวก ฉ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน MIKE21-HD/ST	192
ภาคผนวก ช ขั้นตอนการแสดงผลด้านออก (Animator)	205
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	211

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การแบ่งพื้นที่ตามลุ่มน้ำสาขา	9
2	สภาพภูมิอากาศของลุ่มน้ำป่าสัก	11
3	การผันแปรของปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ยของลุ่มน้ำป่าสัก	12
4	การผันแปรของปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยทั้งลุ่มน้ำป่าสัก	14
5	อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำนองสูงสุดในรอบปีต่างๆ ต่อค่าเฉลี่ยของลุ่มน้ำป่าสัก	16
6	ปริมาณตะกอนแขวนลอยรายปีเฉลี่ยของแต่ละสถานีวัดน้ำในลุ่มน้ำป่าสัก	17
7	กลุ่มดินที่พบในที่ดอนที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืช	18
8	ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินของลุ่มน้ำป่าสัก	21
9	การแบ่งขนาดของตะกอน	29
10	อัตราการตกตะกอนในแม่น้ำป่าสักในแต่ละอัตราการไหลที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองกายภาพ	62
11	ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning’s n จากตำรา Fundamentals of Fluid Mechanics	71
12	การแปลความหมายค่า NSE และ R^2	73
13	ผลการวิเคราะห์ความเร็วของกระแสน้ำ ที่เปอร์เซ็นไทน์ต่างๆของสถานี S.5	84
14	ตัวแปรที่สำคัญ (Parameter) ในแบบจำลอง MIKE21-HD/ST	84
15	อัตราการตกตะกอนในแม่น้ำป่าสักแต่ละอัตราการไหลที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง MIKE21 และแบบจำลองกายภาพ	87
16	อัตราการตกตะกอนรายปีในแม่น้ำป่าสักที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง MIKE21 ตั้งแต่ปี พ.ศ.2550-2555	89
17	ผลการปรับแก้อัตราการตกตะกอนในแม่น้ำป่าสักแต่ละอัตราการไหลที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์	90

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ก1	ข้อมูลปริมาณการไหล และระดับน้ำของสถานีต่างๆ	101
ข1	ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลอนุกรมเวลา สำหรับการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน MIKE21-HD/ST	159
ข2	ระบบแม่น้ำป่าสักที่ใช้จำลองโดย MIKE21	160
ค1	ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลระดับน้ำ	162
ค2	ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลปริมาณการไหล	166
ค3	ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (Sideflow)	170
ง1	ขั้นตอนการสร้าง Mesh จากข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำ	175
จ1	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE21-HD	181
ฉ1	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน MIKE21-HD/ST	193
ช1	ขั้นตอนการแสดงผลด้านออกแบบ Velocity Vector	206
ช2	ขั้นตอนการแสดงผลด้านออกแบบ Sediment rate	210

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่		หน้า
1	แผนที่แสดงขอบเขตการศึกษา	5
2	แผนที่แสดงขอบเขตลุ่มป่าสัก	8
3	แผนที่แสดงลุ่มน้ำสาขา	10
4	การผันแปรของสภาพภูมิอากาศรายเดือน ลุ่มน้ำป่าสัก	12
5	แผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนรายปีเฉลี่ยของลุ่มน้ำป่าสัก ในช่วงปี พ.ศ.2516-พ.ศ.2551	13
6	สถานีวัดน้ำท่า และปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยของลุ่มน้ำป่าสัก	15
7	สภาพทรัพยากรดินในลุ่มน้ำป่าสัก	20
8	สภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำป่าสัก	23
9	ผังแสดงกระบวนการเกิดน้ำท่า	25
10	เส้นทางการไหลของน้ำท่า	26
11	ความเร็วการไหลแบบปั่นป่วน	36
12	ประเภทของการสร้าง Bathymetry	44
13	ตัวอย่างของการสร้าง Mesh แบบ 3 มิติ	45
14	ตัวอย่างผลการจำลองสภาพกระแสน้ำ	46
15	แบบจำลองกายภาพของแม่น้ำป่าสัก	60
16	แสดงขั้นตอนการศึกษา	68
17	แผนที่แสดงสภาพภูมิประเทศของพื้นท้องลำน้ำ (Bathymetry) ของแม่น้ำป่าสัก	76
18	ตัวอย่างโนด (Node) ของ Bathymetry ของแม่น้ำป่าสัก	77
19	ตัวอย่างอีลิเมนต์ (Element) ของ Bathymetry ของแม่น้ำป่าสัก	77
20	ภาพสองมิติ Bathymetry ของแม่น้ำป่าสัก	78
21	ผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์ค่าระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง MIKE21-HD	79
22	ช่วงลำน้ำที่นำมาแสดงตัวอย่างเวคเตอร์ความเร็วน้ำ และอัตราการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำที่ กม.38+500 ถึง กม. 40+500	81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่		หน้า
23	ตัวอย่างผลการจำลองจากแบบจำลอง MIKE21-HD ช่วง กม.38+500 – กม. 40+500	82
24	ตัวอย่างผลการจำลองจากแบบจำลอง MIKE21-HD/ST ช่วง กม.38+500 – กม. 40+500	85
25	โค้งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอน ในแม่น้ำป่าสักที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Steady flow	88
26	โค้งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอน ที่ปรับแก้ด้วยการวิเคราะห์ Unsteady flow	90

ภาพผนวกที่

ภาพผนวกที่		หน้า
ข1	ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลอนุกรมเวลา สำหรับการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน MIKE21-HD/ST	159
ข2	ระบบแม่น้ำป่าสักที่ใช้จำลองโดย MIKE21	160

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสักโดยใช้แบบจำลอง MIKE21

A Study of Sediment Transport in Pasak River Using MIKE21 Model

คำนำ

ลุ่มน้ำป่าสักตั้งอยู่ในเขตภาคกลางของประเทศไทย และมีพื้นที่ตอนบนของลุ่มน้ำบางส่วนอยู่ในเขตภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งมีเทือกเขาเพชรบูรณ์ล้อมรอบ ลักษณะโดยรวมทั้งลุ่มน้ำจะถูกล้อ มรอบด้วยภูเขาทั้ง 2 ด้าน และมีแม่น้ำป่าสักไหลอยู่ตรงกลาง จากทิศเหนือลง สู่ทิศใต้ โดยมีต้นกำเนิดมาจากเทือกเขาเพชรบูรณ์ จากนั้นไหลผ่านจังห วัดเพชรบูรณ์ ลพบุรี และสระบุรี จนมาบรรจบกับแม่น้ำเจ้าพระยา ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ปัญหาที่พบมาก ในพื้นที่ลุ่มน้ำ เป็นปั ญหาต่อเนื่องมาจากปัญหาด้านสภาพทางกายภาพของพื้นที่ รวมกับปัญหาความเสื่อมโทรมของทรัพยากรที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ทำให้เกิดการชะล้างพังทลายของดินลงสู่ลำน้ำ และเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่องจนสุดท้ายตกตะกอนลง โดยมีน้ำเป็นปัจจัยหลักที่ ก่อให้เกิดการกัดเซาะและเป็นตัว พัดพาให้ตะกอนเคลื่อนที่ ทำให้ลำน้ำตื้นเขินเนื่องจากการทับถมของตะกอน ส่งผลกระทบให้ประสิทธิภาพในการระบายน้ำลดลง โดยสภาพปัญหาของอุทกภัยตามแนวริมแม่น้ำป่าสักลดลงไปอย่างมาก ภายหลังจากมีเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ อย่างไรก็ตามบริเวณด้านท้ายน้ำของเขื่อนฯ จนถึงจุดบรรจบระหว่างแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำป่าสัก ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาซึ่งสภาพของแม่น้ำป่าสักในบางช่วงค่อนข้างแคบ และคดเคี้ยวทำให้มีความสามารถในการระบายน้ำต่ำ ซึ่งจะเกิดปัญหาน้ำเอ่อท้น และการตกสะสมของตะกอนภายในลำน้ำซึ่งเป็ นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดลำน้ำลดลง เป็นผลให้การระบายน้ำลดลงอีกด้วย ซึ่งปัญหาดังกล่าวยังไม่มี การศึกษามากนัก จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาถึงสภาพทางอุทกพลศาสตร์ของแม่น้ำป่าสัก และการเคลื่อนที่ของตะกอน เพื่อให้เข้าใจถึงสภา พลำน้ำในปัจจุบัน และเพื่อทราบแนวโน้มของการตกตะกอนในอนาคต เพื่อที่จะหาแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากปัญหาดังกล่าว ได้ส่งผลกระทบต่อประชาชน และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาถึงสภาพทาง อุทกพล ศาสตร์ของแม่น้ำป่าสัก ภายใต้งานวิจัยหัวข้อเรื่อง “การศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสักโดยใช้แบบจำลอง MIKE21” ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อศึกษาให้เข้าใจถึงสภาพลำน้ำในปัจจุบันของสภาพอุทกพลศาสตร์ในพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก จึงเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบ 2 มิติมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เพื่อศึกษาทางด้านอุทกพลศาสตร์ และการเคลื่อนที่ของตะกอน ในการศึกษาครั้งนี้ ได้เลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE21 ซึ่งมีความเหมาะสมในการศึกษาการไหลของน้ำและการเคลื่อนที่ของตะกอนในแม่น้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD/ST เพื่อจำลองสภาพทางอุทกพลศาสตร์ และการเคลื่อนที่ของตะกอน ดินในแม่น้ำป่าสักตั้งแต่ท้ายเขื่อนพระราม 6 จนถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยา

2. ศึกษาอัตราการตกตะกอน ดินรายปีในช่วงตั้งแต่ปี พ .ศ. 2550-2555 โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ 1) กรณีเงื่อนไขขอบเขตเป็นการไหลคงที่ตามเวลา และ 2) กรณีเงื่อนไขขอบเขตเป็นการไหลไม่คงที่ตามเวลา

ขอบเขตการศึกษา

1. พื้นที่ศึกษา คือ แม่น้ำป่าสัก ตั้งแต่ท้ายเขื่อนพระราม 6 จนถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยา รวมระยะทางประมาณ 51.65 กม. แสดงในภาพที่ 1

2. รวบรวมข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำ (River cross section) เลือกใช้ข้อมูลที่ทำการสำรวจในช่วงระหว่างเดือนธันวาคม 2556 จนถึงเดือนมกราคม 2557 จำนวน 1,033 รูปตัด หรือระยะห่างระหว่างรูปตัดประมาณทุกๆ 50 ม. ซึ่งใช้ในการจัดทำแบบจำลองด้านอุทกพลศาสตร์ โดยแต่ละจุดที่สำรวจจะเป็ นข้อมูลในลักษณะของ Textfile ที่มีค่าระดับอ้างอิงจากระดับน้ำทะเล หรือเรียกว่า ม.รทก. ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันในประเทศไทย ดังแสดงในภาพที่ 1

3. รวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำท่า รายชั่วโมง /รายวัน ของสถานีวัดน้ำท่า S.5 (กม.2+400) และS.26 (กม.45+850) ที่ได้มีการบันทึกไว้โดยกรมชลประทาน และสถานีวัดน้ำท่านครหลวง (กม.16+650) ที่ได้มีการบันทึกไว้โดยกรมเจ้าท่า โดยเลือกใช้ข้อมูลนำเข้าย้อนหลัง 5 ปีหลังสุดตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน 2550 จนถึงวันที่ 31 มีนาคม 2556 ดังแสดงในภาพที่ 1

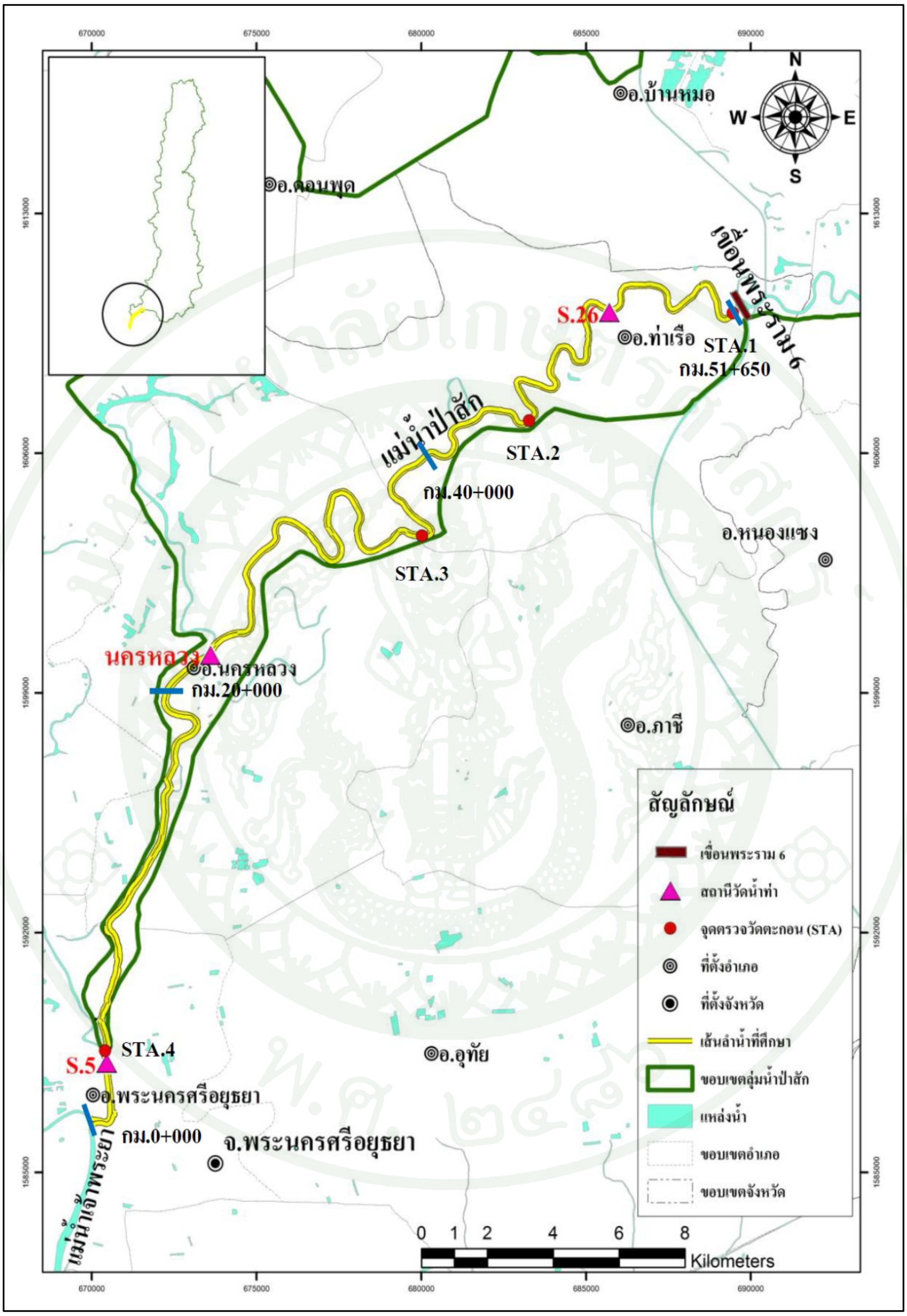
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. รวบรวมข้อมูลตะกอนท้องน้ำ ที่ทำการตรวจวัดในแม่น้ำป่าสัก ตั้งแต่ท้ายเขื่อนพระราม 6 โดยทำการตรวจวัด 4จุดด้วยกัน ได้แก่ 1) วัดสะตือ ตำบลท่าหลวง อำเภอพระนครศรีอยุธยา (กม.51+650) 2) วัดศาลาลอย ตำบลศาลาลอย อำเภอท่าเรือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (กม.38+400) 3) วัดแค ตำบลแค อำเภอท่าเรือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (กม. 30+400) และ4) วัดธรรมนิยม ตำบลหัวรอ อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (กม.2+100) ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2557 ดังแสดงในภาพที่ 1

5. ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MIKE21 ในการจัดทำแบบจำลองสภาพทางอุทกพลศาสตร์ MIKE21-HD และแบบจำลองการเคลื่อนตัวของตะกอนดินด้วยแบบจำลอง MIKE21-ST

6. การศึกษาครั้งนี้ไม่ได้พิจารณาถึงโครงสร้างที่อยู่ในแม่น้ำ และด้านข้างของตลิ่ง ตัวอย่างเช่น สะพาน และท่าเรือ เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 แผนที่แสดงขอบเขตการศึกษา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. พื้นที่ศึกษาลุ่มน้ำป่าสัก

1.1 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

1.1.1 ที่ตั้งพื้นที่ศึกษา

ลุ่มน้ำป่าสักเป็นลุ่มน้ำลำดับที่ 12 จากลุ่มน้ำในประเทศไทย 25 ลุ่มน้ำ ตามการแบ่งของคณะกรรมการอุทกวิทยาแห่งชาติ โดยมีพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 15,623.41 ตร.กม. รูปร่างลุ่มน้ำคล้ายขนนก แคบ เรี ยวยาว มีความกว้างประมาณ 45 กม. และมีความยาวประมาณ 350 กม . เป็นพื้นที่ลุ่มน้ำที่ครอบคลุมบางส่วนเขตภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีอาณาเขตครอบคลุมพื้นที่ 7 จังหวัด ประกอบด้วย จังหวัดเลย จังหวัดเพชรบูรณ์ จังหวัดลพบุรี จังหวัดสระบุรี จังหวัดนคร ราชสีมา จังหวัดชัยภูมิ และจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ขอบเขตพื้นที่ศึกษาอยู่ระหว่างละติจูดที่ 14 องศา 15 ลิปดา ถึง 17 องศา 20 ลิปดาเหนือ และลองติจูดที่ 100 องศา 30 ลิปดา ถึง 101 องศา 30 ลิปดาตะวันออก โดยมีอาณาเขตติดต่อกับพื้นที่ใกล้เคียงดังนี้ (สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน, 2553)

ทิศเหนือ	ติดต่อ	อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย
ทิศใต้	ติดต่อ	อำเภอเมือง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และอำเภอหนองแซง อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี
ทิศตะวันออก	ติดต่อ	อำเภอเทพารักษ์ อำเภอด่านขุนทด อำเภอสีคิ้ว อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา และ อำเภอภักดีชุมพล อำเภอเทพสถิต จังหวัดชัยภูมิ
ทิศตะวันตก	ติดต่อ	อำเภอโคกเจริญ อำเภอสระโบสถ์ อำเภอโคกสำโรง อำเภอเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี และอำเภอชนแดงอำเภอเข้าค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

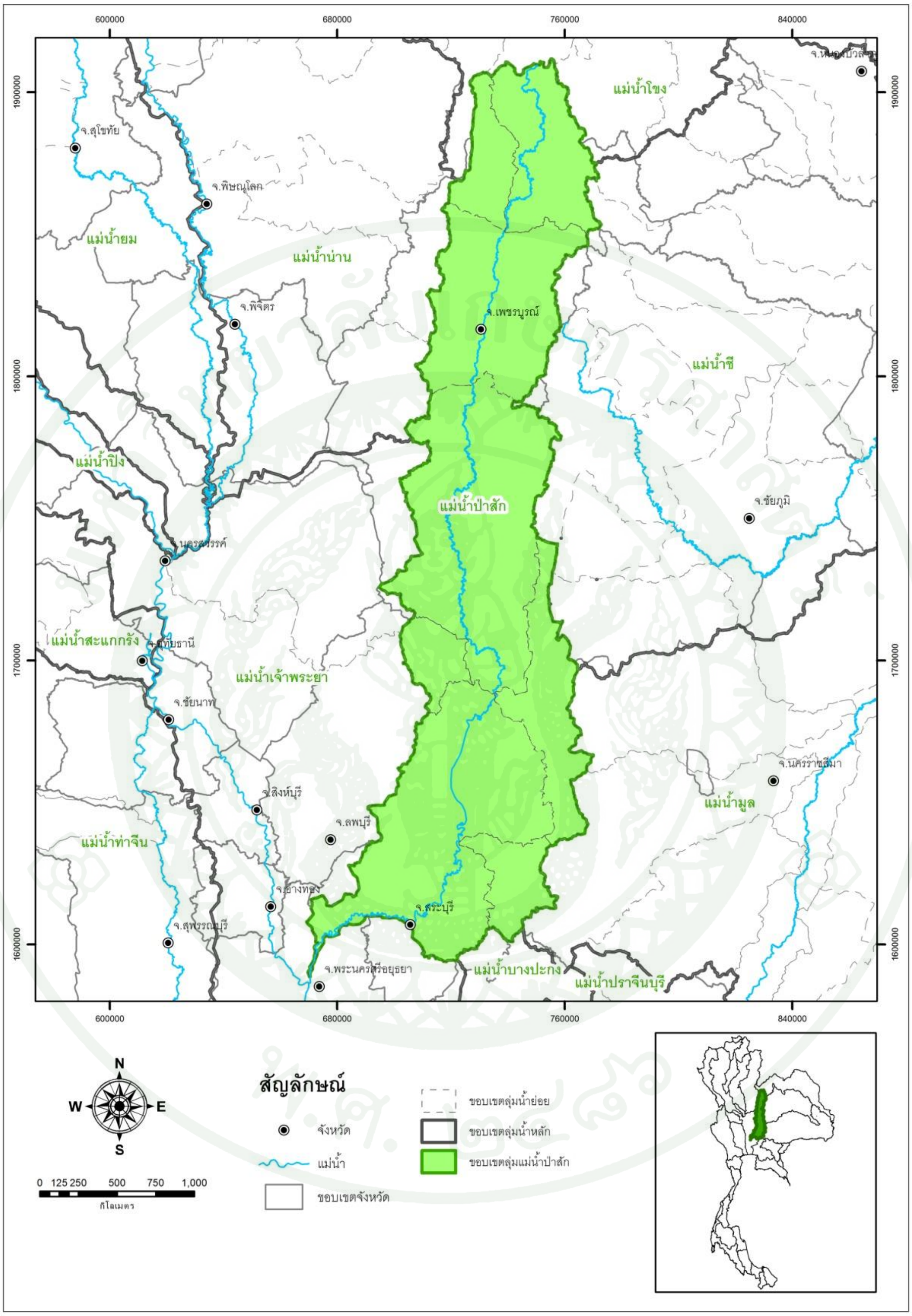
1.1.2 สภาพภูมิประเทศ

ลักษณะภูมิประเทศของลุ่มน้ำป่าสัก บริเวณตอนบนของลุ่มน้ำมีเทือกเขาเพชรบูรณ์ล้อมรอบทั้ง 3 ด้าน ซึ่งเป็นเทือกเขาที่ทอดมาจากสาธารณะรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ลาดสู่ภาคกลางของประเทศไทย ตั้งแต่จังหวัดเลย จนถึงจังหวัดลพบุรี และสระบุรี ยอดเขาและสันเขาที่สำคัญ ได้แก่ ภูสอยดาว ภูเมี่ยง ภูขัด และภูหินร่องกล้า เขาปู่ เขาย่า เขาค้อ เขาผ้าขาว และเขารัง ทางด้านทิศตะวันออกมี ภูหลวง ในจังหวัดเลย และภูเขียว ในจังหวัดชัยภูมิ แบ่งออกเป็นเทือกเขาเพชรบูรณ์ 1 เป็นทิวเขาทางทิศตะวันออก ของแม่น้ำป่าสัก ต่อไปทางใต้เรียกชื่อว่า “ทิวเขาดง พญาเย็น” และ เทือกเขาเพชรบูรณ์ 2 เป็นทิวเขาอยู่ทางตะวันตก ของแม่น้ำป่าสัก ทอดตัวผ่านถนนสาย พิษณุโลก - เพชรบูรณ์ - เลย รวมความยาวประมาณ 350 กม.

ภูมิประเทศโดยรวมทั้งลุ่มน้ำจะถูกล้อมรอบด้วยภูเขาทั้ง 3 ด้าน และมีแม่น้ำป่าสักไหลอยู่ตรงกลางจากทิศเหนือลงทิศใต้ โดยมีต้นกำเนิดมาจากเขตอำเภอด่านซ้ายซึ่งอยู่ทางตอนใต้ของจังหวัดเลย จากนั้นไหลผ่านจังหวัดเพชรบูรณ์ ลพบุรี และสระบุรี จนมาบรรจบกับแม่น้ำเจ้าพระยา

จากลักษณะดังกล่าวทำให้พื้นที่ทางตอนบนของลุ่มน้ำ มีลักษณะเป็นเนินเขาและมีที่ราบเพียงเล็กน้อย ส่วนตอนกลางในเขตจัง หวัดลพบุรีและสระบุรีเป็นที่ราบสลับกับเนินเขา ตอนล่างของลุ่มน้ำบริเวณจุดบรรจบกับแม่น้ำเจ้าพระยาที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาเป็นที่ราบลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 2 (สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน, 2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 2 แผนที่แสดงขอบเขตลุ่มน้ำป่าสัก

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.1.3 ระบบลุ่มน้ำ

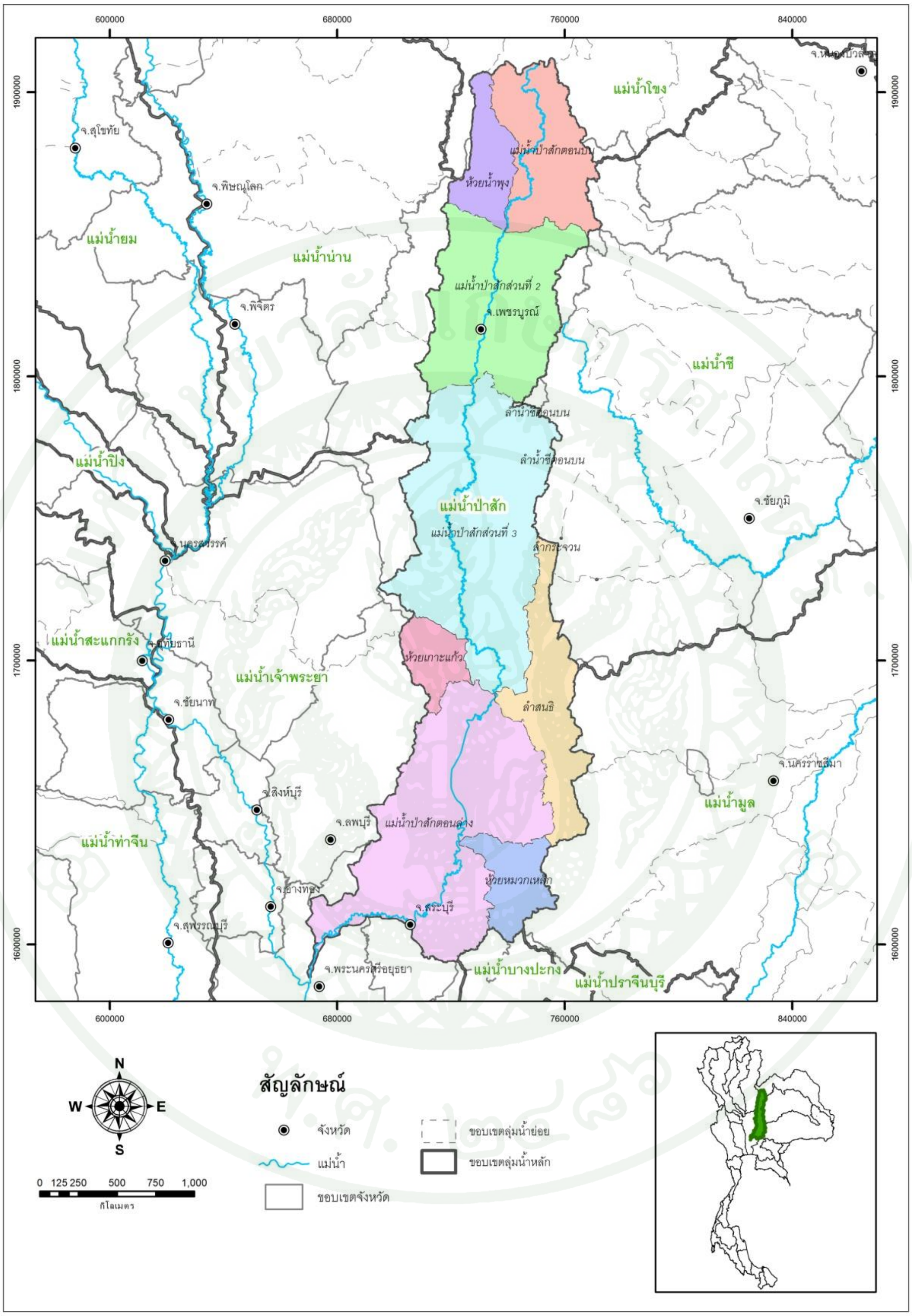
ลำน้ำสาขาของลุ่มน้ำป่าสัก จะมีลักษณะเป็นลำน้ำสายสั้นๆ แยกมาจากทางตะวันตกและตะวันออก ลำน้ำสาขาทางต้นน้ำ ได้แก่ ห้วยน้ำพุง มีต้นกำเนิดจากเทือกเขาเพชรบูรณ์ทางตอนใต้สุดของจังหวัดเลย ไหลขนานมากับแม่น้ำป่าสักและมาบรรจบกันที่อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ ห้วยขอนแก่น มีต้นกำเนิดที่เทือกเขาทางตะวันออกเฉียงเหนือของอำเภอหล่มสัก ลำกง มีต้นกำเนิดจากเทือกเขาทางตะวันออกเฉียงเหนือในเขตอำเภอหนองไผ่ จังหวัดเพชรบูรณ์ ลำน้ำสาขาทางตอนล่างของลุ่มน้ำ ได้แก่ ห้วยเกาะแก้ว มีต้นกำเนิดอยู่ที่เทือกเขาเตี้ยๆ บริเวณรอยต่อระหว่างจังหวัดเพชรบูรณ์กับจังหวัดลพบุรี ไหลมาบรรจบกับแม่น้ำป่าสักทางตอนใต้ของอำเภอศรีเทพ ลำสนธิ เป็นลำน้ำสาขาที่ใหญ่ที่สุดของแม่น้ำป่าสักมีต้นกำเนิดจากเทือกเขาบริเวณรอยต่อระหว่างจังหวัดเพชรบูรณ์ กับจังหวัดชัยภูมิ มีลำน้ำสาขา คือ ลำพญากลาง ลำสนธิไหลมาบรรจบกับแม่น้ำป่าสักที่อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี ห้วยมวกเหล็ก มีต้นกำเนิดจากเทือกเขาบริเวณรอยต่อระหว่างจังหวัดลพบุรีกับจังหวัดนครราชสีมา ไหลมาบรรจบกับแม่น้ำป่าสักที่อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ลุ่มน้ำป่าสักแบ่งออกเป็น 8 ลุ่มน้ำสาขา ตามตารางที่ 1 (สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน, 2553)

ตารางที่ 1 การแบ่งพื้นที่ตามลุ่มน้ำสาขา

รหัสลุ่มน้ำ	**ชื่อลุ่มน้ำสาขา**	**พื้นที่**		
		ตารางกม.	**ไร่**	**ร้อยละ**
1202	แม่น้ำป่าสักตอนบน	1,522.53	951,581.25	9.75
1203	ห้วยน้ำพุง	690.27	431,418.75	4.42
1204	แม่น้ำป่าสักส่วนที่ 2	2,551.45	1,594,656.25	16.33
1205	แม่น้ำป่าสักส่วนที่ 3	4,212.05	2,632,531.25	26.96
1206	ห้วยเกาะแก้ว	491.7	307,312.50	3.15
1207	ลำสนธิ	1,344.94	840,587.50	8.61
1208	แม่น้ำป่าสักตอนล่าง	4,146.83	2,591,768.75	26.54
1209	ห้วยหมวกเหล็ก	663.64	414,775.00	4.25
	รวม	**15,623.41**	**9,764,631.25**	**100**

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 แผนที่แสดงลุ่มน้ำสาขา

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

1.2 สภาพอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยา

1.2.1 สภาพภูมิอากาศ

สภาพภูมิอากาศของลุ่มน้ำป่าสัก ได้ศึกษาจากข้อมูลของสถานีตรวจอากาศที่สำรวจโดยกรมชลประทาน ประกอบด้วยข้อมูลที่สำคัญคือ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลมผิวพื้น และอัตราการระเหย ในช่วงปี พ.ศ.2524 - 2553 ดังตารางที่ 2 (สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน, 2553)

ตารางที่ 2 สภาพภูมิอากาศของลุ่มน้ำป่าสัก

ข้อมูลภูมิอากาศที่สำคัญ	หน่วย	ช่วงพิสัยค่ารายปี	ค่ารายปีเฉลี่ย
อุณหภูมิอากาศ	องศาเซลเซียส	29.9 – 19.9	25.8
ความชื้นสัมพัทธ์	เปอร์เซ็นต์	98.8 – 70.5	90.3
ความเร็วลมผิวพื้น	กิโลเมตรต่อชั่วโมง	1.19 – 0.18	0.59
อัตราการระเหย	มิลลิเมตร	910.7 – 892.8	901.8

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

1.2.2 ปริมาณฝน

ปริมาณน้ำฝนในลุ่มน้ำป่าสัก ได้ศึกษาจากข้อมูลสถานีวัดน้ำฝนของหน่วยงานต่างๆ ได้แก่ กรมอุตุนิยมวิทยา กรมชลประทาน และกรมป่าไม้ โดยนำข้อมูลน้ำฝนรายปีเฉลี่ย ในช่วงปี พ.ศ.2495 - 2551 มาสร้างแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนรายปีเฉลี่ย ดังภาพที่ 5 พอสรุปได้ว่า ค่าปริมาณน้ำฝนรายปีเฉลี่ยผันแปรตั้งแต่ 1,012.1 มม. จนถึง 1,611.5 มม. มีค่าน้ำฝนรายปีเฉลี่ยทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 1,210.2 มม. เป็นปริมาณน้ำฝนในช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม – ตุลาคม) ประมาณ 1,044.6 มม. (คิดเป็นร้อยละ 86.3 ของปริมาณน้ำฝนทั้งปี) และเป็นปริมาณน้ำฝนในช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน – เมษายน) ประมาณ 165.6 มม. (คิดเป็นร้อยละ 13.7 ของปริมาณน้ำฝนทั้งปี) โดยสรุปการผันแปรของปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ยทั้งลุ่มน้ำป่าสัก ดังตารางที่ 3 (สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน, 2553)

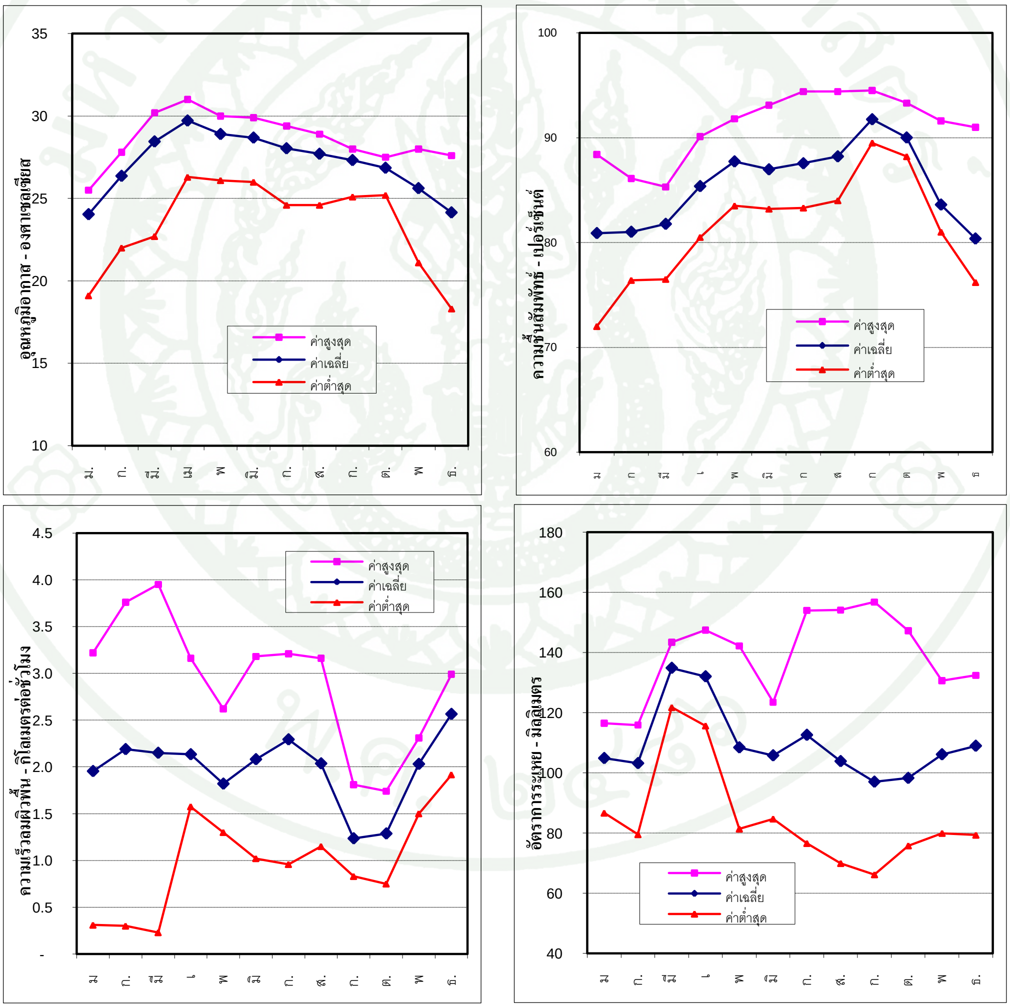
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 การผันแปรของปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ยของลุ่มน้ำป่าสัก

(หน่วย: มิลลิเมตร)

ปี พศ.	เมย.	พค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	รวมปี	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
2495-2551	72.6	152.2	151.1	159.8	198.3	255.9	127.3	25.4	5.3	5.7	16.1	40.5	1,210.20	1,044.60	165.6
สูงสุด2499	108.1	279.5	225.5	220.4	256.2	273.8	128.4	19	1.4	10.1	20.1	98.2	1,640.70	1,383.80	256.9
ต่ำสุด2547	67.5	123.2	124.4	143.9	134.2	175.2	17.2	0.6	0	1.4	0.7	29.5	817.8	718.1	99.7

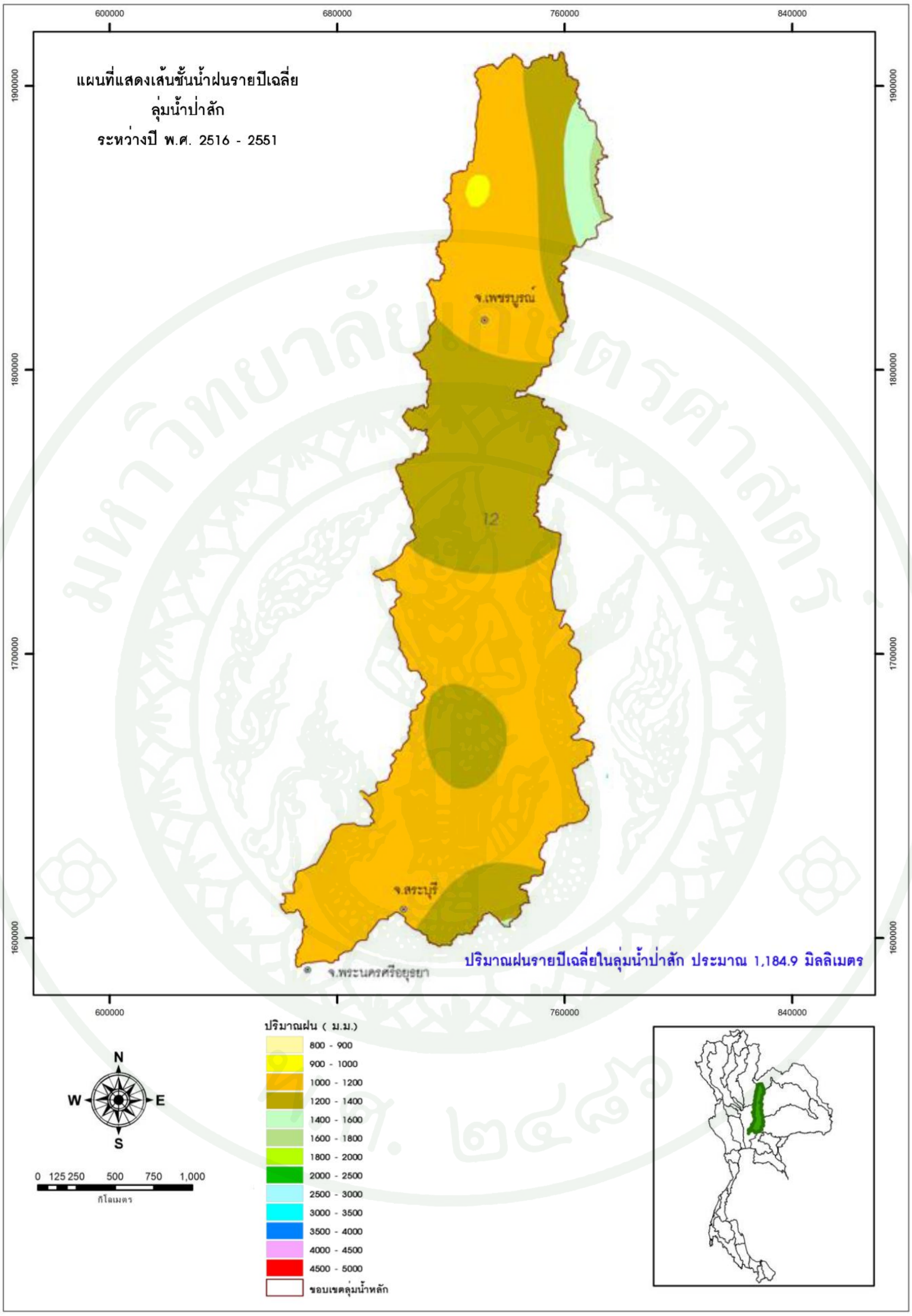
ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)



ภาพที่ 4 การผันแปรของสภาพภูมิอากาศรายเดือนของลุ่มน้ำป่าสัก

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 5 แผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนรายปีเฉลี่ยของลุ่มน้ำป่าสัก ในช่วงปี พ.ศ.2516-2551

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2.3 ปริมาณน้ำท่า

จากข้อมูลพื้นที่และปริมาณน้ำท่าที่ประเมินได้ ในช่วงปี พ.ศ.2509 - 2551 สรุปได้ว่า พื้นที่ลุ่มน้ำป่าสัก มีพื้นที่รับน้ำฝนทั้งหมด 15,623 ตร.กม. มีปริมาณน้ำท่าตามธรรมชาติรายปีเฉลี่ย 3,321.0ล้าน ลบ.ม. โดยเป็นปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยในช่วงฤดูฝน ประมาณ 2,680.9ล้าน ลบ.ม. (คิดเป็นร้อยละ 80.7 ของปริมาณน้ำทั้งปี) และเป็นปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยในช่วงฤดูแล้ง ประมาณ 640.1 ล้าน ลบ.ม. (คิดเป็นร้อยละ 19.3 ของปริมาณน้ำทั้งปี) โดยได้สรุปการผันแปรของปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยทั้งลุ่มน้ำป่าสัก ดังตารางที่ 4 และแสดงที่ตั้งของสถานีวัดน้ำท่าในลุ่มน้ำป่าสัก และการผันแปรของปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย ในภาพที่ 6 (สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน, 2553)

ตารางที่ 4 การผันแปรของปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยทั้งลุ่มน้ำป่าสัก

(หน่วย: ล้านลูกบาศก์เมตร)

ปี พศ.	เมย.	พค.	มิย.	กค.	สค.	กย.	ตค.	พย.	ธค.	มค.	กพ.	มีค.	รวมปี	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
2509-2551	75.1	136.9	225.4	269.9	586.7	993.7	468.4	177.3	144.1	90.4	74.6	78.6	3,321.0	2,680.9	640.1
สูงสุด2521	138.1	207.1	174.4	801.5	1,057.60	1,319.2	918.4	229.1	220.4	136.9	161	193.4	5,557.1	4,478.2	1078.9
ต่ำสุด2541	0.4	20.5	63.5	315.4	512.1	350.8	96.6	30.9	14.8	0.4	0.4	0.3	1,406.3	1,359.0	47.3

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

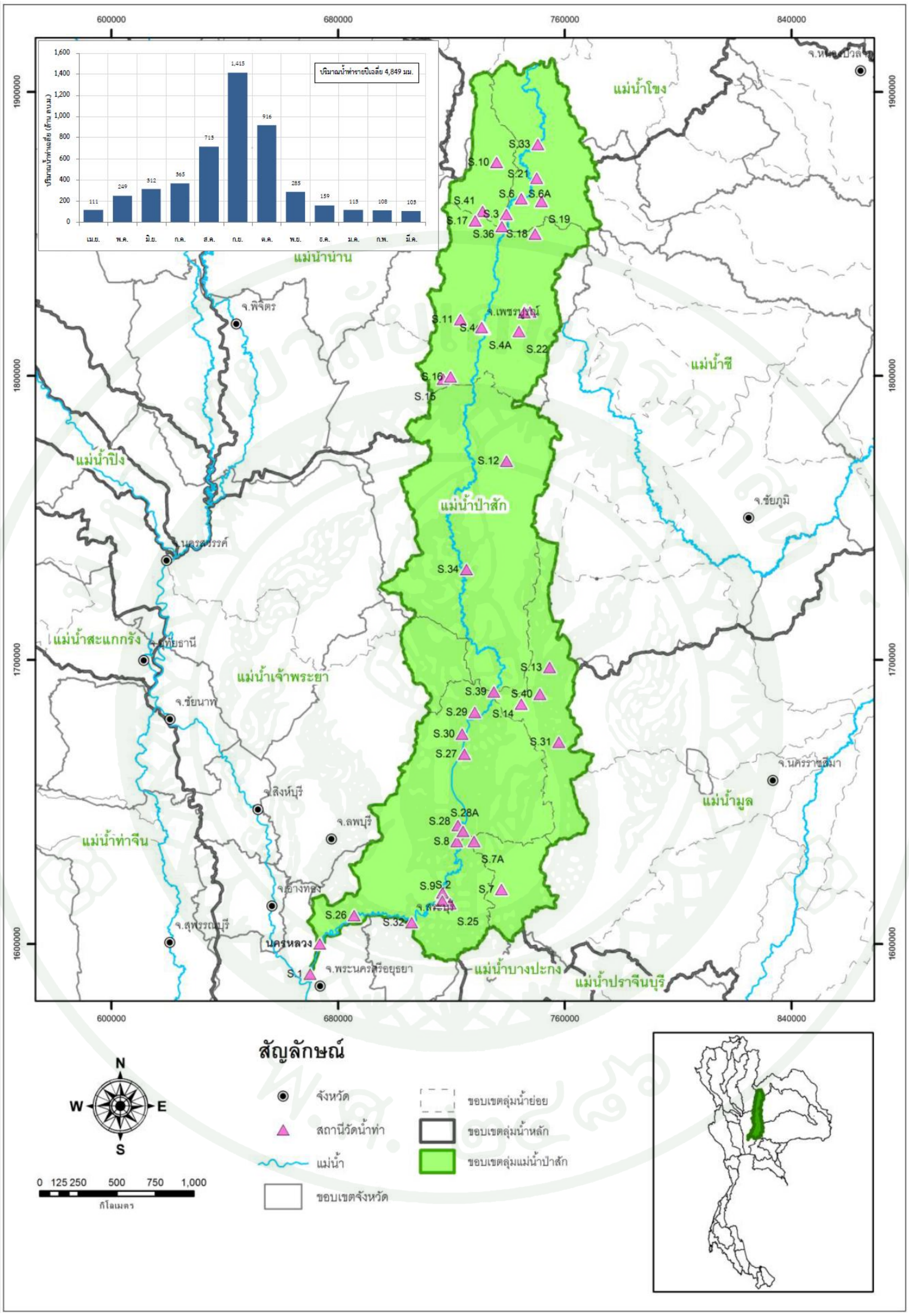
และจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยกับขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสัก ได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$Q_m = 0.8006\,A^{0.8369} \qquad R^2 = 0.9628 \qquad (1)$$

เมื่อ Q_m = ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)

A = ขนาดพื้นที่รับน้ำฝน (ตร.กม.)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 สถานีวัดน้ำท่า และปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยของลุ่มน้ำป่าสัก

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2.4 ปริมาณน้ำนองสูงสุด

จากการศึกษาข้อมูลปริมาณน้ำนองสูงสุดที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสัก ซึ่งสำรวจโดยกรมชลประทานในช่วงปี พ .ศ.2509 -2551 เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำนองสูงสุด กับขนาดพื้นที่รับน้ำฝน จะได้สมการ ดังนี้

$$Q_P = 6.9808 A^{0.4705} \qquad R^2 = 0.8382 \qquad (2)$$

เมื่อ Q_P = ปริมาณน้ำนองสูงสุดเฉลี่ย (ลบ.ม./วินาที)
A = ขนาดพื้นที่รับน้ำฝน (ตร.กม.)

ผลจากการวิเคราะห์ค่าความถี่ในการเกิดปริมาณน้ำนองสูงสุดในรอบปีต่างๆ ด้วยวิธีกัมเบล ได้ค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำนองสูงสุดในรอบปีต่างๆ ต่อค่าเฉลี่ยของลุ่มน้ำป่าสัก ดังนี้

ตารางที่ 5 อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำนองสูงสุดในรอบปีต่างๆ ต่อค่าเฉลี่ยของลุ่มน้ำป่าสัก

Qt/Qf	2 ปี	5 ปี	10 ปี	25 ปี	50 ปี	100 ปี	200 ปี	500 ปี	1,000 ปี
เฉลี่ย	0.90	1.63	2.12	2.74	3.20	3.65	4.10	4.70	5.15
สูงสุด	0.96	1.94	2.66	3.56	4.24	4.90	5.57	6.45	7.11
ต่ำสุด	0.84	1.27	1.48	1.73	1.92	2.11	2.30	2.55	2.74

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

1.2.5 ตะกอน

ทำการทบทวนการรวบรวมข้อมูลปริมาณตะกอนแขวนลอยจากสถานีวัดน้ำในลุ่มน้ำป่าสักของหน่วยงานต่างๆ ได้แก่ กรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยา และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จำนวน 53สถานี มีเพียง 6 สถานี ที่มีช่วงเวลาของการจดบันทึกข้อมูลค่าปริมาณน้ำหลากครบตลอดทั้งปี รายละเอียดของแต่ละสถานี แสดงดังตารางที่ 6 ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยรายปีเฉลี่ยกับพื้นที่รับน้ำ ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$Q_S = 1153.3\ A^{0.691} \qquad R^2 = 0.7148 \qquad (3)$$

เมื่อ Q_S = ปริมาณตะกอนแขวนลอยรายปีเฉลี่ย (ตัน/ปี)
A = พื้นที่รับน้ำฝน (ตร.กม.)

ตารางที่ 6 ปริมาณตะกอนแขวนลอยรายปีเฉลี่ยของแต่ละสถานีวัดน้ำในลุ่มน้ำป่าสัก

ลำดับ	รหัสสถานี	คลอง/แม่น้ำ	ตำแหน่ง			พื้นที่รับน้ำ (ตร.กม.)	ช่วงปีสถิติข้อมูล (พ.ศ.)	ปริมาณตะกอนแขวนลอยรายปีเฉลี่ย (ตัน)
			ที่ตั้ง/บริเวณ	อำเภอ	จังหวัด			
1	S.9	ป่าสัก	บ้านเมืองเหนือ	แก่งคอย	สระบุรี	14,374	2521-2537, 2542	648,342
2	S.13	ลำสนธิ	บ้านท่าเยี่ยม	ลำสนธิ	ลพบุรี	359	2531-2537, 2539-2542	52,075
3	S.14	ลำสนธิ	บ้านนาโสม	ชัยบาดาล	ลพบุรี	1,247	2531-2537, 2539-2542	513,938
4	S.31	ลำพระยากลาง	บ้านบางหูเสือ	ชัยบาดาล	ลพบุรี	381	2531-2537, 2539-2542	45,030
5	SE.1	ป่าสัก	อุ่มกะหาด	หล่มเก่า	เพชรบูรณ์	333	2530-2537	81,623
6	SN.1	ป่าสัก	แก่งสีดา	หล่มเก่า	เพชรบูรณ์	836	2506-2520, 2522-2524	77,705

ที่มา: สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (2554)

1.3 ทรัพยากรดินและการใช้ประโยชน์ที่ดิน

1.3.1 ทรัพยากรดินลุ่มน้ำป่าสัก

ลักษณะทรัพยากรดิน ลุ่มน้ำป่าสัก จากการศึกษาโปรแกรมแผนปฏิบัติการพัฒนาทรัพยากรดิน Land Plan 3.0 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2545) จำแนกกลุ่มดินตามสภาพพื้นที่และความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ปลู กพืชหลัก เป็น 2 ประเภท ได้แก่ กลุ่มดินที่พบในที่ราบต่ำที่เหมาะสมสำหรับการปลูกข้าว กลุ่มดินที่พบในที่ดอนที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชไร่ไม้ผลไม้ยืนต้น และกลุ่มดินอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 กลุ่มดินที่พบในที่ดอนที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืช

ประเภทกลุ่มดิน ลุ่มน้ำป่าสัก	**เนื้อที่ (ไร่)**	**ร้อยละ (%)**
กลุ่มดินบนที่ราบต่ำ	2,107,164.0	21.58
กลุ่มดินบนที่ดอน	4,635,948	47.47
กลุ่มดินบนที่ลาดชันเชิงซ้อน (slope >35%), (SU)	2,868,685	29.38
พื้นที่อาศัย โรงงาน สุสาน, (U)	582	0.04
พื้นที่น้ำ, (W)	10,561	0.11
อื่นๆ (ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เหมืองเก่า ที่หินโผล่ unknown)	141,691	1.42
รวมทั้งหมด	**9,764,631**	**100**

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

1.3.2 สภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน

ลุ่มน้ำป่าสักมีพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งสิ้น 9,764,631 ไร่ จากการศึกษาข้อมูลภูมิสารสนเทศ การวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินของ กรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ.2551-2552 พบว่า สภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินลุ่มน้ำป่าสักจำแนกฯเป็น 5 ประเภทหลัก คือ

ประเภท A พื้นที่เกษตรกรรม มีพื้นที่ประมาณ 5,659,758 ไร่ หรือร้อยละ 57.96 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

ประเภท F พื้นที่ป่าไม้ มีพื้นที่ประมาณ 3,098,936ไร่ หรือร้อยละ 31.74 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

ประเภท M พื้นที่เบ็ดเตล็ด (Miscellaneous) มีพื้นที่ประมาณ 361,987 ไร่ หรือร้อยละ 3.71 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

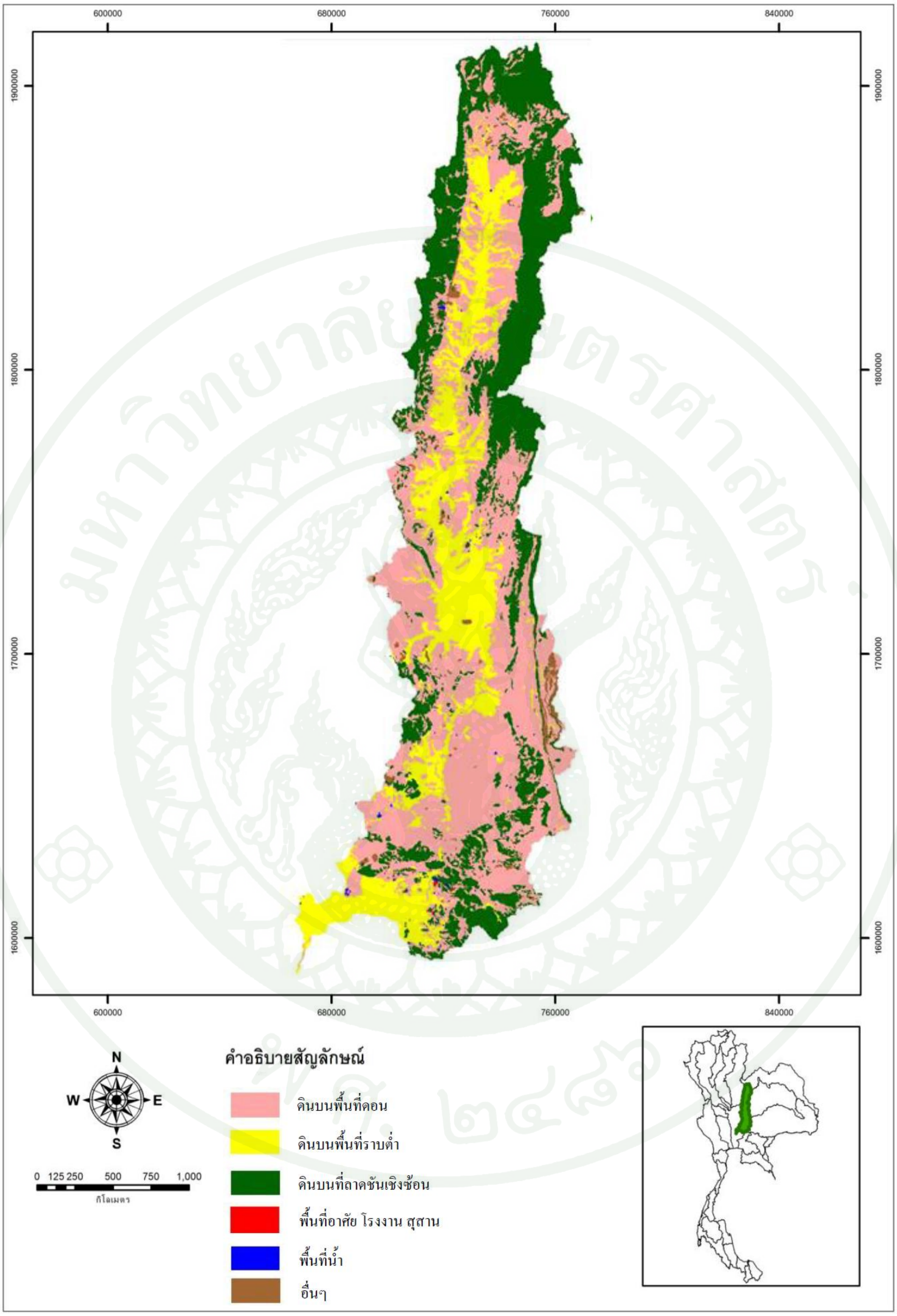
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประเภท U พื้นที่ชุมชน/สิ่งปลูกสร้าง มีพื้นที่ประมาณ 495,827 ไร่ หรือร้อยละ 5.08 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

ประเภท W พื้นที่น้ำ มีพื้นที่ประมาณ 148,123ไร่ หรือร้อยละ 1.51 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

โดยรายละเอียดของการใช้ประโยชน์ที่ดิน แสดงในตารางที่ 8 และภาพที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 สภาพทรัพยากรดินในลุ่มน้ำป่าสัก

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2551-2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินของลุ่มน้ำป่าสัก

ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน ลุ่มน้ำป่าสัก	ไร่	ร้อยละ	ไร่	ร้อยละ
A พื้นที่เกษตรกรรม			**5,659,758**	**57.96**
A0 เกษตรผสมผสาน/ไร่นาสวนผสม	2,548	0.03		
A1 นาข้าว	1,718,254	17.6		
A2 พืชไร่	3,230,103	33.08		
A3 ไม้ยืนต้น	172,573	1.77		
A4 ไม้ผล	440,545	4.51		
A5 พืชสวน	5,840	0.06		
A6 ไร่หมุนเวียน	14,659	0.15		
A7 ทุ่งหญ้าและโรงเรือนเลี้ยงสัตว์	65,684	0.67		
A9 สถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	9,552	0.1		
F ป่าไม้			**3,098,936**	**31.74**
F1 ป่าไม้ผลัดใบ	269,790	2.76		
F2 ป่าผลัดใบ	2,654,294	27.18		
F5 สวนป่าปลูก	174,852	1.79		
M พื้นที่เบ็ดเตล็ด (Miscellaneous)			**361,987**	**3.71**
M1 ทุ่งหญ้าธรรมชาติ (Rangeland)	275,659	2.82		
M2 พื้นที่ลุ่ม (Wetland)	48,242	0.49		
M3 เหมืองแร่/บ่อขุด (Mine, Pit)	29,124	0.3		
M4 เบ็ดเตล็ดอื่นๆ	8,962	0.09		
U ชุมชน/สิ่งปลูกสร้าง			**495,827**	**5.08**
U1 ตัวเมืองและย่านการค้า	37,827	0.39		
U2 หมู่บ้าน	325,233	3.33		
U3 สถานที่ราชการ /สถาบันต่างๆ	43,837	0.45		
U4 สถานีคมนาคม	25,012	0.26		
U5 ย่านอุตสาหกรรม	48,978	0.5		
U6 สิ่งปลูกสร้างอื่นๆ	14,940	0.15		

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 (ต่อ)

ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน ลุ่มน้ำป่าสัก	ไร่	ร้อยละ	ไร่	ร้อยละ
W พื้นที่น้ำ			**148,123**	**1.51**
W1 แหล่งน้ำธรรมชาติ	47,149	0.48		
W2 แหล่งน้ำที่สร้างขึ้น	100,974	1.03		
รวมทั้งหมด	**9,764,631**	**100**	**9,764,631**	**100**

ที่มา: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน (2553)

1.3.3 การเกษตร

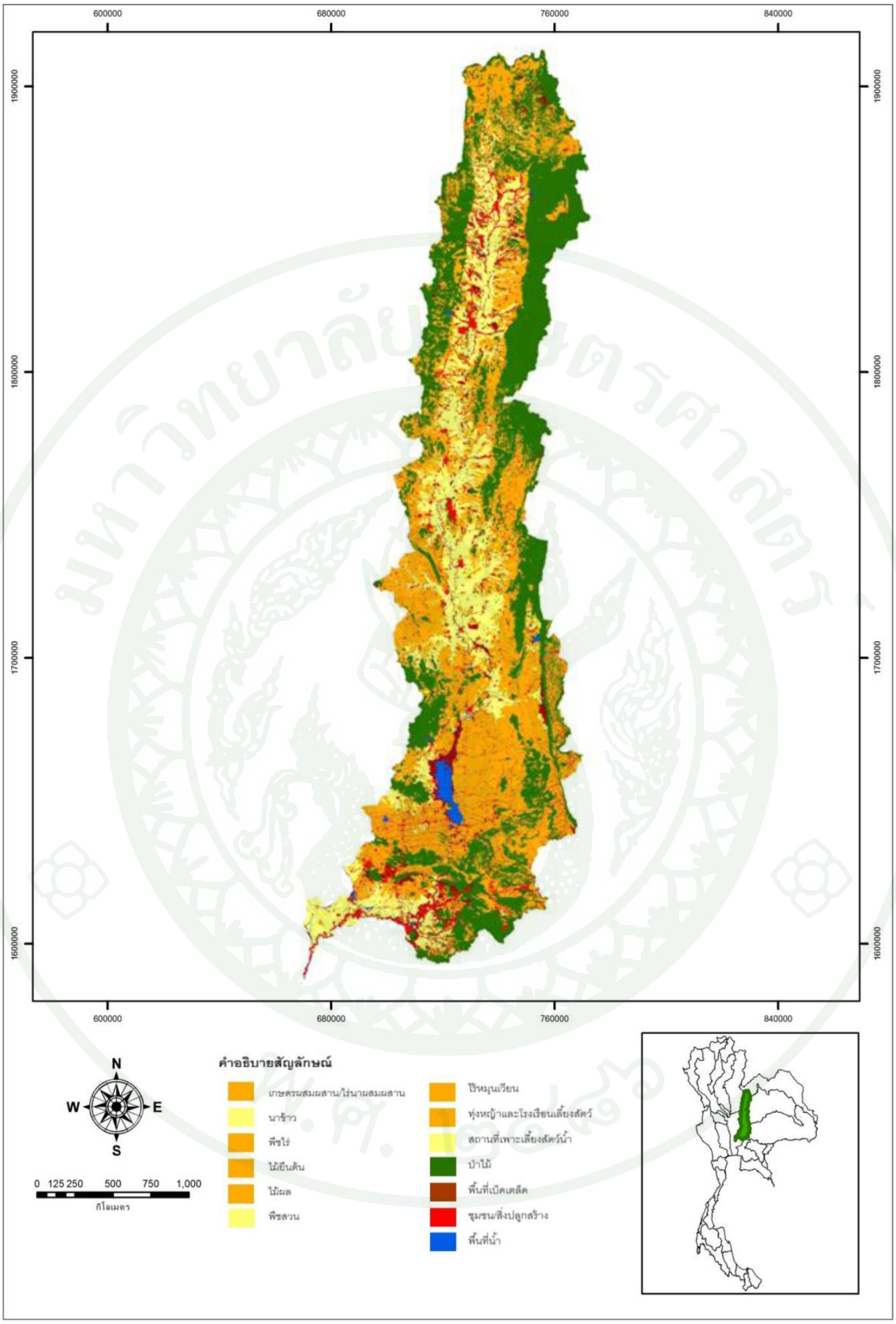
จากการจำแนกสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินของลุ่มน้ำป่าสัก พบว่าเป็นพื้นที่เกษตรกรรมประมาณ 5,659,758 ไร่ หรือร้อยละ 57.96 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่งสามารถจำแนกการเกษตรได้เป็น 9 ประเภท ดังตารางที่ 8 ประเภทเกษตรกรรมสูงสุด 3 อันดับแรกได้แก่

ประเภท A2 พืชไร่ มีพื้นที่ประมาณ 3,230,103 ไร่ หรือร้อยละ 33.08 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

ประเภท A1 นาข้าว มีพื้นที่ประมาณ 1,718,254 ไร่ หรือร้อยละ 17.60 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

ประเภท A4 ไม้ผล มีพื้นที่ประมาณ 440,545 ไร่ หรือร้อยละ 4.51 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 สภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำป่าสัก

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2551-2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ลุ่มน้ำ

ลุ่มน้ำ หมายถึง พื้นที่ทั้งหมดซึ่งน้ำท่าผิวดิน (Surface runoff) ที่เกิดจากฝนที่ตกลงบนพื้นที่นั้น จะไหลออกสู่จุดออก ได้แก่ ปากแม่น้ำ หรือจุดที่สนใจ (Point of concentration) ดังนั้น เมื่อใดก็ตามที่กล่าวถึงพื้นที่ลุ่มน้ำ ต้องระบุให้ชัดเจนว่าเป็นพื้นที่ลุ่มน้ำเหนือจุดใด เช่นพื้นที่ลุ่มน้ำปิงเหนือเขื่อนภูมิพล มีพื้นที่เท่ากับ 26,386 ตร.กม. เป็นต้น ดังนั้นพื้นที่ลุ่มน้ำสำหรับลำน้ำหรือแม่น้ำใดๆจะมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อจุดออกหรือตำแหน่งที่พิจารณาในลำน้ำเคลื่อนไปทางด้านท้ายน้ำเส้นแบ่งเขตลุ่มน้ำ เรียกว่า สันปันน้ำ เป็นเส้นที่วิ่งไปตามแนวสูงสุดของพื้นที่ ฝนที่ตกลงมาในพื้นที่ที่อยู่นอกสันปันน้ำจะไหลลงไปสู่ลุ่มน้ำอื่น ซึ่งลุ่มน้ำป่าสักมีพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด 15,623.41 ตร.กม. ส่วนพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีพื้นที่ลุ่มน้ำคิดเป็นร้อยละ 6 ของพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด

3. ขบวนการเกิดน้ำท่า

นอกจากน้ำฝนแล้ว น้ำท่าหรือน้ำในแม่น้ำก็นับว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญตัวหนึ่งทางด้านอุทกวิทยา หรือวิศวกรจะต้องทราบ เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการพัฒนาแหล่งน้ำใช้ศึกษาปริมาณน้ำในโครงการป้องกันน้ำท่วม ตลอดจนนำไปใช้คำนวณขนาดของเขื่อน อ่างเก็บน้ำ และอาคารชลศาสตร์ต่างๆ (วิษุวัฒก์, 2555)

ที่มาของน้ำในแม่น้ำลำธารนั้น มีความซับซ้อน ซึ่ง น้ำที่ไหลมารวมกันในแม่น้ำ (Total runoff) ดังภาพที่ 7 นั้นประกอบไปด้วย 4 ส่วน ได้แก่ 1) ฝนที่ตกลงในลำน้ำโดยตรง (Channel precipitation, Q_p) 2) น้ำผิวดิน (Overland flow, Q_o หรือ Surface runoff) 3) น้ำใต้ผิวดิน (Interflow, Q_t หรือ Subsurface flow) และ 4) น้ำใต้ดิน (Groundwater flow, Q_g) แต่เนื่องจากเส้นทางการไหลของน้ำฝนที่ตกลงมาในลุ่มน้ำมีความซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงไปมา การตรวจวัดปริมาณน้ำในแต่ละส่วนนั้นทำได้ยาก ในการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำท่าจึงนิยมพิจารณาน้ำ ในแม่น้ำเป็น 2 ส่วน คือ น้ำที่ไหลมาอยู่ในลำน้ำเร็ว เรียกว่า Direct runoff (หรือ Quickflow) และน้ำที่ไหลมาอยู่ในลำน้ำช้า เรียกว่า Baseflow

- Direct runoff

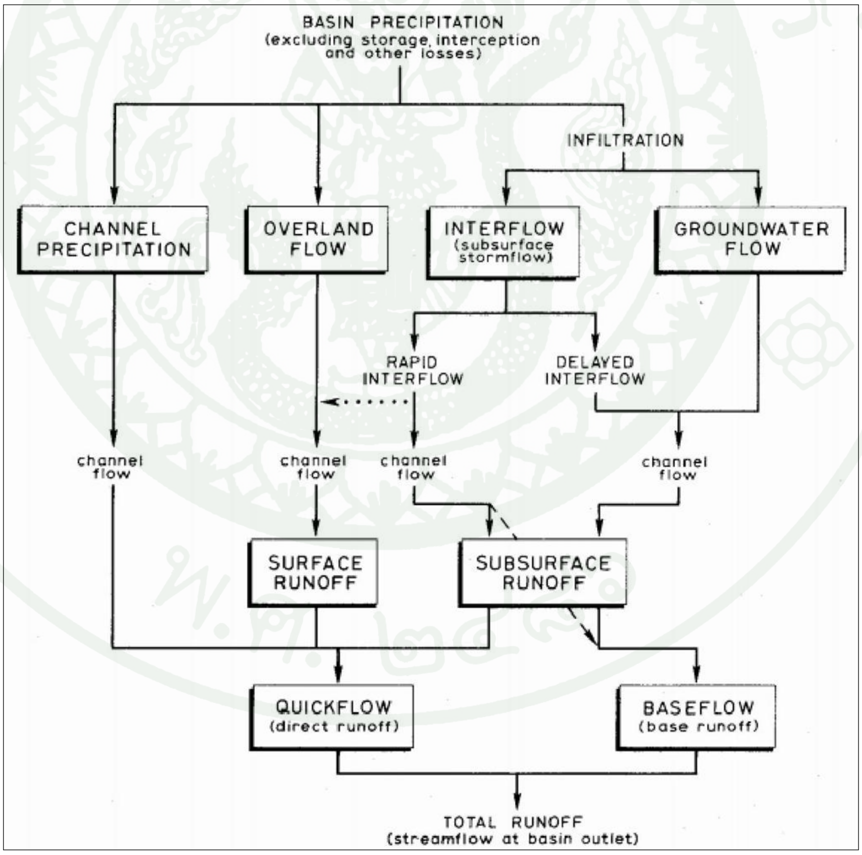
เป็นน้ำฝนที่ตกลงมาและไหลไปตามผิวดิน (Surface runoff) นอกจากนี้ ยังรวมถึงน้ำฝนที่ตกลงในลำน้ำโดยตรง และน้ำไหลใต้ผิวดินบางส่วนที่ไหลพ้นผิวดินขึ้นมา โดยการเกิด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ของ Direct runoff นี้อาจเกิดขึ้นทันทีเมื่อฝนเริ่มตกหรือหลังจากฝนตกไม่นาน และเพิ่มปริมาณจนถึงจุดสูงสุด จากนั้นจะค่อยๆ ลดลง โดยปริมาณน้ำสูงสุดนั้นอาจเกิดขณะ ฝนกำลังตกก็ได้หากฝนตกต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน แต่โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นหลังจากฝนหยุดตกไประยะหนึ่ง เนื่องจากน้ำ จากจุดต่างๆ ในพื้นที่จะต้องใช้เวลาระยะหนึ่งในการไหลมารวมตัวกันที่ทางออก ซึ่งระยะเวลาขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะทางกายภาพอื่นๆ ของลุ่มน้ำ

- Baseflow

เป็นน้ำที่ไหลมาทางใต้ดินซึ่งไหลได้ช้ากว่า เวลาในการเดินทางจากจุดที่ฝนตกลงม า จนกระทั่งถึงทางออกของลุ่มน้ำอาจเป็นระยะเวลาหลายวัน จนกระทั่งเป็นปี ปริมาณของน้ำส่วนนี้ในลำน้ำค่อนข้างจะคงที่โดยมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล



ภาพที่ 9 ผังแสดงกระบวนการเกิดน้ำท่า

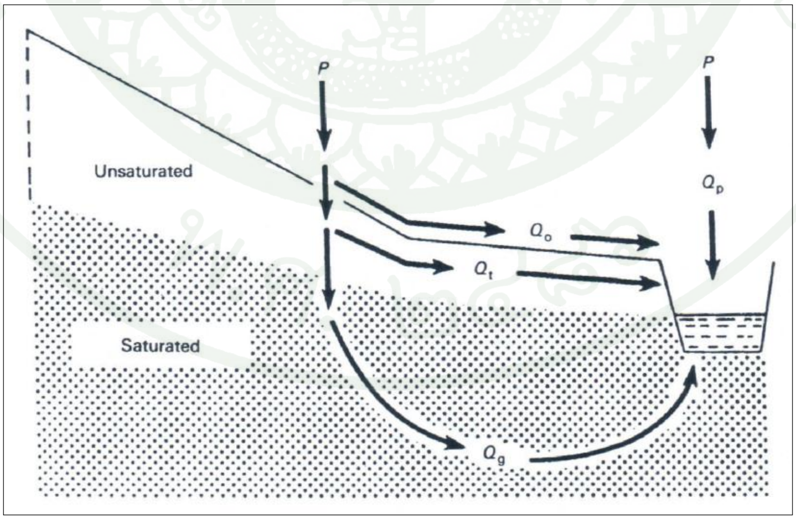
ที่มา: เอกสิทธิ์ (2547)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1 น้ำท่าที่ไหลบนผิวดิน (Overland flow, Q_O)

ปริมาณน้ำฝน (P) ที่ตกลงสู่ผิวโลกบางส่วนจะสูญเสียไปเนื่องจากการระเหย, ตกค้างอยู่ตามใบไม้ใบหญ้าของพืชที่ขึ้นปกคลุมดิน (Interception), ตกค้างอยู่ในบ่อ แอ่ง หลุม ตามผิวดินซึ่งไม่ได้ติดต่อกับระบบลำน้ำของพื้นที่ลุ่มน้ำ (Depression storage), การซึมผ่านผิวดินและอาจจะซึมลึกลงไปถึงแหล่งน้ำใต้ดิน ถ้าปริมาณน้ำฝนมากกว่ากาสูญเสียดังกล่าว จะทำให้ปริมาณน้ำฝนสุทธิไหลผ่านตามผิวดิน ซึ่งเราเรียกว่า Overland flow หรือ Surface runoff แต่ก่อนจะเกิด Surface runoff จะมีปริมาณน้ำส่วนหนึ่งเกาะยึดตามผิวดินเป็นแผ่นบางๆ น้ำส่วนนี้เรียกว่า Surface detention ปริมาณน้ำส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวและแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับผิวดิน ขณะที่ฝนตกความลึกของ Surface detention จะเพิ่มมากขึ้นจนกลายเป็น Surface runoff ไหลไปบนผิวดิน ดังแสดงเส้นทางการไหลใน ภาพที่ 9 หลังจากที่ฝนหยุดตก Surface detention จะค่อยๆ ลดปริมาณลงโดยหายไปในรูปของ Surface runoff, การระเหยและการซึมผ่านผิวดิน

ถ้าดินมีคุณสมบัติที่ย่อมให้น้ำซึมผ่านผิวดินได้น้อยหรือซึมผ่านไม่ได้ยกตัวอย่างเช่น ดินเหนียว ในพื้นที่ลุ่มน้ำดังกล่าวจะมี Surface runoff มาก ปริมาณของ Surface runoff เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของกราฟน้ำท่า เพราะเป็นปริมาณน้ำส่วนแรกที่เคลื่อนตัวสู่ลำน้ำในระหว่างฝนตก ในขณะที่องค์ประกอบตัวอื่นเคลื่อนตัวสู่ลำน้ำช้ากว่า



ภาพที่ 10 เส้นทางการไหลของน้ำท่า

ที่มา: Ward and Robinson (1990)

3.2 น้ำที่ไหลใต้ผิวดิน (Interflow, Q_t)

Interflow (หรือ Subsurface flow หรือ น้ำซับ) เป็นปริมาณน้ำส่วนที่ซึมผ่านผิวดิน แล้วเคลื่อนตัวออกไปทางด้านข้างตามความลาดชันของชั้นดินที่อยู่ใกล้ผิวดิน จนกระทั่งไหลออกสู่ลำน้ำในที่สุด หรือ Interflow จะไหลออกสู่ผิวดิน ตรงบริเวณที่ชั้นดินที่น้ำซึมผ่านได้ยากมาตัดกับผิวดิน กลายเป็น Surface runoff และไหลออกสู่ลำน้ำในที่สุดเช่นกัน

ปริมาณของ Interflow ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติโครงสร้างของดินในลุ่มน้ำ ถ้ามีชั้นดินที่น้ำซึมผ่านได้ยากหรือซึมผ่านไม่ได้ อยู่ใกล้ผิวดินเป็นแนวยาว ลักษณะชั้นดินเช่นนี้จะทำให้เกิดปริมาณของ Interflow มากในพื้นที่ลุ่มน้ำ เพราะช่วยลดการซึมของน้ำลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน เมื่อน้ำซึมลงมาถึงชั้นดินดังกล่าว ก็จะไหลอกทางด้านข้างไปตามความลาดชันของชั้นดิน ออกสู่ผิวดินหรือลำน้ำในที่สุด

ปริมาณของ Interflow เป็นส่วนที่เหลือจากการหักปริมาณน้ำที่ไหลซึมลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน Interflow เคลื่อนตัวออกสู่ลำน้ำได้ช้ากว่า Surface runoff จึงเป็นผลทำให้ฐานเวลาของกราฟน้ำท่าเพิ่มขึ้น

3.3 น้ำใต้ดิน (Groundwater flow, Q_g)

Groundwater flow เป็นองค์ประกอบของ น้ำท่าที่เคลื่อนตัวสู่ลำน้ำช้าที่สุด ในบางพื้นที่ลุ่มน้ำ การเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินกินเวลาเป็นปี ฉะนั้นจึงไม่ใช่ส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดปริมาณน้ำท่วมสูงสุด น้ำใต้ดินที่กล่าวถึงนี้ ส่วนใหญ่เป็นปริมาณน้ำที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน (Ground water table)

น้ำใต้ดินที่เป็นองค์ประกอบของน้ำท่าเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า Base flow ในพื้นที่ลุ่มน้ำที่ดินส่วนใหญ่มีคุณสมบัติย่อมให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย ยกตัวอย่างเช่น ดินทราย น้ำฝนส่วนใหญ่จะซึมลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้น ดังนั้นลุ่มน้ำดังกล่าวจะมี Surface runoff เกิดขึ้นน้อย น้ำท่าที่ปรากฏในลำน้ำส่วนใหญ่จะเป็นน้ำใต้ดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.4 ฝนที่ตกลงในลำน้ำโดยตรง (Channel precipitation, Q_p)

Channel precipitation เป็นน้ำฝนที่ตกลงบนผิวน้ำของทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ และลำน้ำ ปริมาณน้ำส่วนนี้มีค่าเท่ากับความลึกของน้ำฝนเฉลี่ย คูณด้วยพื้นที่ของผิวน้ำและปริมาณน้ำส่วนนี้จะไหลลงสู่ระบบลำน้ำของพื้นที่ลุ่มน้ำได้ทันที เปอร์เซ็นต์ของ Channel precipitation จะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของลุ่มน้ำ และเวลา เพราะระดับน้ำในทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ และลำน้ำมีการขึ้นๆ ลงๆ อยู่เสมอ ทำให้พื้นที่ของผิวน้ำเป ลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยส่วนใหญ่พื้นที่ผิวน้ำจะไม่เกิน 5% ของพื้นที่ทั้งหมดของลุ่มน้ำ เมื่อระดับน้ำอยู่สูงปานกลาง

4. ตะกอนแม่น้ำ (River sediment)

ตะกอนในแม่น้ำคือวัสดุที่อยู่ในแม่น้ำ การขนส่งตะกอน (Sediment transport) อาจเป็นในลักษณะ แขวนลอยไปกับน้ำ (Suspension) หรือตกตะกอนทับถมกันที่ท้องน้ำ (Deposition) ตะกอนเป็นปัญหาด้านวิศวกรรมแม่น้ำหลายประการ เช่น การพัดพาและการตกตะกอนในบริเวณท่าเรือ ทำให้เรือแล่นเข้าออกจากท่าไม่สะดวก การพัดพาของตะกอนเข้าสู่เครื่องจักรกลใต้น้ำ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า การกัดเซาะของต ะกอนที่ฐานรากของโครงสร้างในน้ำทำให้โครงสร้างเอียงและทรุดได้ เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงกระบวนการเคลื่อนที่ การกัดเซาะ (Erosion) และการตกตะกอนทับถม (Deposition) (ชัยยุทธ, 2550)

4.1 กระบวนการเคลื่อนที่ของตะกอน (Sediment transport processes)

กระบวนการเคลื่อนที่ของตะกอนเริ่มต้นจากต้นน้ำบนพื้นที่สูงไปสู่ท้ายน้ำบนพื้นที่ต่ำ เช่น การพัดพาตะกอนจากพื้นที่ภูเขาไปสู่ทะเล ความแตกต่างของระดับพื้นนี้ ทำให้เกิดพลังงานในการเคลื่อนที่ของตะกอน ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนของการกัดเซาะและการตกตะกอนเป็นระยะๆ ตะกอนที่ตกอาจถูกกระแสน้ำพัดให้ลอยกลับขึ้นมาและเคลื่อนตัวไปพร้อมกับกระแสน้ำอีกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของกระแสน้ำ นั่นแสดงว่าตะกอนไม่ได้เคลื่อนที่จากต้นน้ำไปยังท้ายน้ำหรือทะเลโดยตรง แต่ผ่านกระบวนการกัดเซาะและตกตะกอนเป็นระยะๆ

เมื่อพิจารณาถึงระยะทางที่ตะกอนแต่ละขนาดเดินทาง พบว่าสำหรับตะกอนเม็ดละเอียด เช่น ทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) อาจถูกพัดพาไปไกลถึงทะเล ในขณะที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตะกอนเม็ดใหญ่ๆ จะไปได้ไม่ไกลมากนักจากแหล่งกำเนิด ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วของกระแสน้ำที่ลดลง เนื่องจากลักษณะข องแม่น้ำที่มีความกว้างที่เพิ่มขึ้น และความลาดชันที่ลดลงไปตามทิศทางการไหล ดังนั้นที่บริเวณปากแม่น้ำ จึงมักมีความกว้างมาก พื้นที่มีลักษณะแบนราบและมีแต่ตะกอนประเภท โคลนเลน และดินเหนี่ยวปรากฏอยู่เท่านั้น โดยมีสภาพเป็นดินดอนสามเหลี่ยมหรือสันดอนปาก-แม่น้ำ (Delta) ส่งผลให้เกิดปัญหาท้องน้ำตื้นเขิน

4.2 การจำแนกตะกอน (Classification of sediment)

ตะกอนแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มคือตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive) เช่น โคลน-เลน ดินเหนียว และตะกอนที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Non-cohesive) เช่น ทราย กรวด เป็นต้น การแบ่งขนาดตะกอนมีอยู่ 2 มาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การแบ่งขนาดของตะกอน

British Standard and M.L.T.		**American Geophysical Union**	
Clay	< 2 µm	Clay	< 1/256 mm
Fine silt	2-6 µm	Silt	1/256-1/16 mm
Medium silt	6-20 µm	Very fine sand	1/16-1/8 mm
Coarse silt	20-60 µm	Fine sand	1/8-1/4 mm
Fine sand	60-200 µm	Medium sand	1/4-1/2 mm
Medium sand	200-600 µm	Coarse sand	1/2-1 mm
Coarse sand	600 µm-2 mm	Very coarse sand	1-2 mm
Fine gravel	2 mm-6 mm	Very fine sand	2-4 mm
Medium gravel	6 mm-20 mm	Fine gravel	4-8 mm
Coarse gravel	20 mm-60 mm	Medium gravel	8-16 mm
Cobbles	60 mm-200 mm	Coarse gravel	16-32 mm
		Very coarse gravel	32-64 mm
		Small cobbles	64-128 mm
		Large cobbles	128-256 mm
		boulders	> 256 mm

ที่มา: Jansen *et al.* (1979)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตะกอนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของตะกอนไปกับกระแสน้ำ โดยสัมพันธ์กับขนาดตะกอน คือ 1) ตะกอนท้องน้ำ (Bed load) เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ มีการเคลื่อนที่สัมผัสไปกับท้องน้ำด้วยการกลิ้ง การเลื่อน (Rolling) ไปตามท้องน้ำ (Sliding) ไปตามท้องน้ำ และการกระโดด (Jumping) หรือการกระโดดเป็นช่วงๆ (Saltation) เคลื่อนที่เป็นช่วงๆเป็นระยะทางไม่ไกลเหนือท้องน้ำไม่สูงนัก ตะกอนชนิดนี้มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของท้องน้ำและตลิ่ง 2) ตะกอนแขวนลอย (Suspended load) เป็นตะกอนขนาดเล็กที่แขวนลอยไปกับน้ำ ด้วยแรงยกของการไหลแบบปั่นป่วน ตะกอนชนิดนี้จะคงสภาพแขวนลอยไปกับน้ำด้วยระยะเวลานานและสามารถลอยไปได้ไกล โดยทั่วไปตะกอนแขวนลอยจะมีสัดส่วนมากที่สุดเมื่อเทียบกับตะกอนชนิดอื่นๆ และ 3) ตะกอนชะล้าง (Wash load) เป็นตะกอนละเอียดที่มีขนาดเล็กมากมีน้ำหนักเบา จึงลอยได้ในน้ำและไม่พบตามท้องน้ำ ดังนั้นตะกอนชนิดนี้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแม่น้ำ

4.3 ลักษณะการกัดเซาะ (Characteristics of erosion)

ลักษณะการกัดเซาะในพื้นที่ลุ่มน้ำหนึ่งๆ แบ่งออกได้เป็นธชนิด ได้แก่ 1) การกัดเซาะเป็นแผ่นหรือการกร่อนแบบแผ่ซ่าน (Sheet erosion) เกิดจากการที่น้ำฝนที่ตกลงมาใหม่ๆ ไหลแผ่เป็นบริเวณกว้าง จึงเป็นการกัดเซาะบนผิวพื้นดิน ครอบคลุมพื้นที่กว้าง โดยที่รูปแบบและขนาดของร่องน้ำมีขนาดเล็กเพียงพอที่ทำให้ผิวกลับมาเรียบได้ด้วยวิธีการพรวนดิน การกัดเซาะแบบร่องยาวตื้นๆ ที่เรียกว่ารองน้ำ ริน (Rill erosion) ก็จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ร่องน้ำรินมักเกิดในชั่วครั้งชั่วคราวระหว่างฝนตกหนักโดยที่ร่องน้ำค่อนข้างขนานกัน 2) การกัดเซาะเป็นร่องลึกหรือร่องธาร (Gully erosion) เกิดจากการเคลื่อนย้ายของมวลดินจากการไหลของน้ำที่รุนแรงขึ้นจากการรวมตัวของน้ำฝนบนพื้นที่ลาดชัน การกัดเซาะจึงรุนแรงเกิดเป็นร่องการไหลที่ลึก และ 3) การกัดเซาะแบบธารน้ำ (Stream channel erosion) เมื่อตลิ่งและท้องน้ำของร่องน้ำเล็กๆ ยังคงถูกเซาะเนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวยังคงมีความลาดชันอยู่ ทำให้ร่องน้ำเล็กๆ ที่อยู่ใกล้กันรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นกลายเป็นลำธาร จากลำธารอาจรวมกันต่อไปกลายเป็นแม่น้ำ กระบวนการกัดเซาะเหล่านี้ในทางวิศวกรรมแม่น้ำ อาจเรียกรวมๆกันว่าการกัดเซาะ เช่น การกัดเซาะท้องน้ำ การกัดเซาะตลิ่ง เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ชลศาสตร์ของแม่น้ำ (Hydraulics of river)

ชลศาสตร์ของแม่น้ำเป็นเรื่องทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับกลศาสตร์ของน้ำในแม่น้ำ ในการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของน้ำในแม่น้ำ โดยทั่วไปจะสมมติให้ท้องน้ำและรูปตัดตามขวางมีสภาพคงเดิม ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนหรือการกัดเซาะของตลิ่ง จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพท้องน้ำหรือหน้าตัดขวางอันเนื่องมาจากแรงเฉือนของน้ำที่ไหลผ่านจากการไหลในแม่น้ำ คุณสมบัติการไหล เช่น ความลึกและความเร็วการไหล มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจึงเป็นการไหลแบบคงที่ (Steady flow) หรือกึ่งคงที่ (Quasi-steady flow) ในแต่ละช่วงเวลาได้ นอกจากนั้นยังสามารถพิจารณาการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform flow) เมื่อรูปตัดขวางหรือความลึกการไหลคงที่ตลอดเส้นทางการไหล ซึ่งเป็นจริงได้ในกรณีการไหลในคลองชลประทานที่ลำเลียงน้ำในอัตราการไหลที่คงที่ แต่สำหรับการไหลในแม่น้ำซึ่งหน้าตัดขวางการไหล คือความกว้างและความลึกการไหล เปลี่ยนแปลงตลอดเส้นทาง กา รไหลจะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ (non-uniform flow หรือ varied flow) (ชัยยุทธ, 2550)

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของน้ำ ความซับซ้อนของการคำนวณขึ้นอยู่กับจำนวนมิติที่เกี่ยวข้อง เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงการไหลจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งในการไหล ซึ่งเป็น การไหลแบบสามมิติ พบว่ามีความยุ่งยากซับซ้อนมาก ความรู้ความเข้าใจในรายละเอียดของรูปแบบการไหลในสามมิตินี้มีจำกัด นอกจากนี้แล้ว การเก็บข้อมูลในสนามเพื่อการวิเคราะห์ให้ครบทั้งสามมิติเป็นไปไม่ได้ อย่างไรก็ตามในทางวิศวกรรมแม่น้ำ พบว่าข้อมูลของค่าเฉลี่ยของตัวแป รที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการไหลต่างๆ มีความเพียงพอต่อความต้องการในการแก้ปัญหาแล้ว (Chinnarasri *et al.*, 2007) ดังนั้นมิติที่นำมาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์การไหลในแม่น้ำที่นิยมใช้กัน จึงแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

1) แบบจำลองสองมิติตามแนวราบ (2-D horizontal model) ได้จากการเฉลี่ยการไหลตลอดความลึกของแม่น้ำที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ตัวแปรการไหล เช่นความเร็วการไหลที่วิเคราะห์ได้จะผันแปรไปตามทิศทางตามยาวและด้านข้างของการไหล จึงเหมาะสำหรับการคำนวณการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการไหล และการเปลี่ยนแปลงรูป ร่างของแม่น้ำในแนวตามยาว และบริเวณตลิ่งแม่น้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2) แบบจำลองสองมิติตามแนวดิ่ง (2-D vertical model) ได้จากการเฉลี่ยการไหลทางด้านข้างของการไหล ตัวแปรการไหล เช่นความเร็วการไหล ที่วิเคราะห์ได้จะผันแปรไปตามตำแหน่งตามทิศทางตามยาวและทิศทางในแนวดิ่ง จึงเหมาะสำหรับการคำนวณการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแม่น้ำในแนวตามยาวและบริเวณท้องน้ำ

3) แบบจำลองหนึ่งมิติ (1-D model) ทำได้โดยการเฉลี่ยการไหลตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดขวาง ผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่อยู่ตำแหน่งตามทิศทางตามยาวเท่านั้น ซึ่งแบบจำลองชนิ ดนี้สามารถให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจสำหรับการศึกษาในช่วงลำน้ำยาว โดยที่ความลึกและความกว้างของแม่น้ำจะมีค่าน้อยเปรียบเทียบกับความยาวของแม่น้ำในช่วงที่กำลังพิจารณา และการเปลี่ยนแปลงรูปหน้า-ตัดขวางการไหลเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป

ในการคำนวณการเคลื่ อนที่ของน้ำในแม่น้ำที่มีท้องน้ำ และรูปตัดตามขวางคงเดิมตลอดเส้นทางการไหล ไม่ว่าจะเป็นการไหลในหนึ่ง สอง หรือสามมิติ จำเป็นต้องอาศัยสมการควบคุมการไหล ทั้งนี้สมการควบคุมการไหลนี้สามารถเปลี่ยนรูปแบบไปตามเงื่อนไขของการไหลประเภทต่างๆ ได้ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไปนี้

5.1 สมการพื้นฐาน (Basic equations)

สมการการเคลื่อนที่ (Equations of motion) ของน้ำในแม่น้ำ ใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในช่วงของแม่น้ำที่กำลังพิจารณาที่เวลาต่างๆ สมการควบคุม (Governing equations) ประกอบไปด้วยการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) และการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) เมื่อพิจารณาการไหลครบทั้ง 3มิติ สามารถเขียนได้ดังนี้

การอนุรักษ์มวล (Conservation of mass)

กฎของการอนุรักษ์มวล กล่าวไว้ว่ามวลสารภายในระบบปิดหนึ่งๆ มีค่าคงที่กับเวลา เขียนเป็นสมการไ ด้ว่า $\frac{DM}{Dt}=0$ หรือ $\frac{D}{Dt}\iiint_{xyz}\rho dxdydz=0$ เมื่อ $\frac{D}{Dt}$ คืออนุพันธ์สัมบูรณ์ (absolute derivative) ρ คือความหนาแน่นของของไหล และ (x,y,z) คือองค์ประกอบของ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระบบแกนพิกัดฉากซึ่งเป็นระบบแกนที่เข้าใจง่าย สำหรับปริมาตรจำกัดขนาดเล็กมากๆ แล้วสมการความต่อเนื่องสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho W)}{\partial z}=0 \qquad (4)$$

เมื่อ U,V และ W คือองค์ประกอบของความเร็วในแกน x, y และ z ตามลำดับ และสำหรับน้ำซึ่งเป็นของการไหลที่ความหนาแน่นคงที่ (ของไหลที่ถูกอัดตัวไม่ได้) สมการความต่อเนื่องจึงเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}+\frac{\partial W}{\partial z}=0 \qquad (5)$$

การอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum)

อาศัยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน คือ $\sum\vec{F}=\frac{D}{Dt}\left(M\vec{V}\right)$ เมื่อ $\sum\vec{F}$ คือผลรวมภายนอกที่กระทำต่อระบบซึ่งรวมถึงน้ำหนักสสารเองด้วย M คือมวลรวม และ $\vec{V}$ คือความเร็วของศูนย์กลางมวลของระบบ แรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม (Control volume, CV) ได้แก่ แรงกระทำบนผิวควบคุม (Control surface, CS) เช่นความดันและแรงเฉือน แรงที่กระทำต่อปริมาตรผ่านศูนย์กลางของมวล เช่นแรงจากแรงโน้มถ่วงของโลก กฎข้อที่สองของนิวตันจึงเขียนได้เป็น

$$\sum\vec{F}=\frac{\partial}{\partial t}\left(\int_{CV}\rho\vec{V}d\forall\right)+\int_{CS}\rho\vec{V}\vec{V}dA \qquad (6)$$

สำหรับปริมาตรจำกัดที่มีขนาดเล็กมากๆ สมการโมเมนตัมในองค์ประกอบ i ของเวกเตอร์ จึงเขียนได้เป็น

$$\frac{D(\rho V_i)}{Dt}=\left(\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t}+\sum_j V_j\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial x_j}\right)=\rho F_{vol-i}+\sum_j\frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j} \qquad (7)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ V_i คือองค์ประกอบความเร็วในทิศทาง i, F_{vol} คือผลรวมของแรงที่กระทำต่อปริมาตร (ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร), σ_{ij} คือ Stress tensor คือตัวห้อย i และ j เป็นองค์ประกอบของระบบพิกัดฉาก เมื่อพิจารณาถึงแรงที่กระทำต่อการไหล คือ แรงเนื่องจากความดันและแรงเนื่องจากความหนืด สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลที่มีความหนาแน่นคงที่ อาจเขียนได้เป็น

$$\rho\left(\frac{\partial V_x}{\partial t}+\sum_j V_j\frac{\partial V_x}{\partial x_j}\right)=\rho F_{vol-x}-\frac{\partial P}{\partial x}+F_{visc-x} \qquad (8)$$

$$\rho\left(\frac{\partial V_y}{\partial t}+\sum_j V_j\frac{\partial V_y}{\partial x_j}\right)=\rho F_{vol-y}-\frac{\partial P}{\partial y}+F_{visc-y} \qquad (9)$$

$$\rho\left(\frac{\partial V_z}{\partial t}+\sum_j V_j\frac{\partial V_z}{\partial x_j}\right)=\rho F_{vol-z}-\frac{\partial P}{\partial z}-F_{visc-z} \qquad (10)$$

เมื่อตัวห้อย j หมายถึงองค์ประกอบในระบบแกนพิกัดฉาก คือใช้แทนทิศทาง x, y และ z จากสมการข้างต้น เทอมทางซ้ายมือของสมการคือผลรวมของโมเมนตัมสะสม กับฟลักซ์ของโมเมนตัม (Momentum flux) ในขณะที่เทอมทางขวามือของสมการคือ ผลรวมของแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม สมการข้างต้นนี้เรียกว่า Navier-Stokes และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการไหลของน้ำในทางน้ำเปิด สมการข้างต้นเมื่อไม่พิจารณาแรงเนื่องจากความหนืด อาจเขียดได้ว่า

$$\frac{\partial U}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(U^2\right)+\frac{\partial}{\partial y}(UV)+\frac{\partial}{\partial z}(UW)+g\frac{\partial z_w}{\partial x}=0 \qquad (11)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(UV)+\frac{\partial}{\partial y}\left(V^2\right)+\frac{\partial}{\partial z}(VW)+g\frac{\partial z_w}{\partial y}=0 \qquad (12)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(UW)+\frac{\partial}{\partial y}(VW)+\frac{\partial}{\partial z}\left(W^2\right)+\frac{1}{\rho}\frac{\partial z_w}{\partial z}=-g \qquad (13)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

องค์ประกอบของความเร็วในทิศทาง x, y และ z กำหนดโดย U, V และ W ตามลำดับ เมื่อ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก , ρ คือความหนาแน่นของน้ำ และ z_w คือ ระดับน้ำเหนือเส้นระดับอ้างอิง

สมการควบคุมการไหลนี้อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า 1) ความหนาแน่นของน้ำคงที่ แม้ว่าความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยที่ไหลมากับน้ำจะผันแปรตามความลึก (ความเข้มข้นของตะกอนมากที่บริเวณท้องน้ำ แต่เจือจางที่บริเวณผิวน้ำ) 2) ไม่คำนึงถึงอิทธิพลของความเร่งเนื่องจากการหมุนของโลก (Geostrophic acceleration) ซึ่งทำให้น้ำไหลในแนวนอน อิทธิพลนี้มีผลในกรณีที่แม่น้ำมีความกว้างหลาย กิโลเมตร 3) ไม่คำนึงถึงอิทธิพลของความหนืดของน้ำเนื่องจากความเค้นจากความปั่นป่วน (Turbulent stress) ของการไหลมีอิทธิพลมากกว่า และ 4) ท้องน้ำมีความลาดเอียงน้อย ทำให้ความเร่งและความเค้นเฉือนในแนวดิ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ดังนั้นสมการโมเมนตัมในแนวดิ่ง (13) จึงลดรูปเหลือเพียงความสัมพันธ์ของความดันสถิต เขียนได้ดังนี้

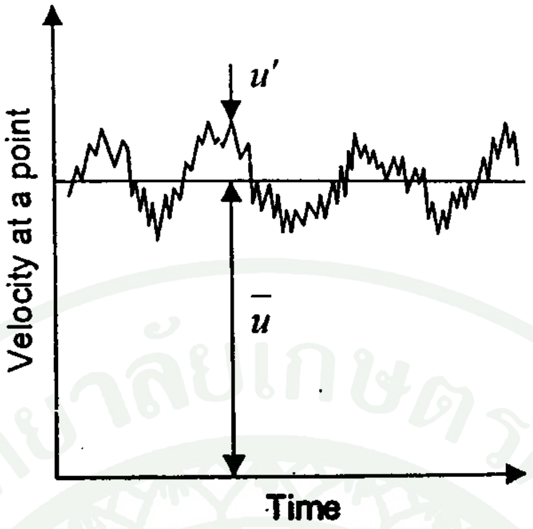
$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \qquad (14)$$

จาการที่ความดันเนื่องจากแรงกระทำของน้ำหมดไปที่ผิวน้ำ (z_w) ดังนั้นเมื่อทำการหาปริพันธ์ (Integration) สมการที่ (14) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความลึกของน้ำ คือ $P = \rho g(z_w - z)$

โดยทั่วไป การไหลในแม่น้ำเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งหมายถึงองค์ประกอบของความเร็วและความดันมีการกระเพื่อม (Fluctuation) คือเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆ รอบๆค่าเฉลี่ยของมัน ตัวอย่างเช่น $U = \bar{u} + u'$ เมื่อ $\bar{u}$ คือความเร็วเฉลี่ย และ u' คือความเร็วที่เฉไปจากค่าเฉลี่ย แสดงภาพที่ 11 เมื่อลองแทนค่าองค์ประกอบของความเร็วลงในสมการโมเมนตัม (11) ถึง (13) เทอมความเร่งจากการพา (Convective acceleration) จะเขียนได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้คือ

$$\frac{\partial (UW)}{\partial z} = \overline{\frac{\partial}{\partial z}\left[(\bar{u} + u')(\bar{w} + w')\right]} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\overline{\bar{u}\bar{w}} + \overline{\bar{u}w'} + \overline{u'\bar{w}} + \overline{u'w'}\right] = \frac{\partial}{\partial z}\left(\bar{u}\bar{w} + \overline{u'w'}\right) \qquad (15)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 11 ความเร็วการไหลแบบปั่นป่วน

ที่มา: ชัยยุทธ (2550)

เทอมประเภท $\overline{u}\overline{w'}$ หายไปเพราะว่าค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆต้องเป็นศูนย์ และเทอม $\overline{u'w'}$ เมื่อคูณด้วย $-\rho$ ทำให้มีลักษณะทางกายภาพเป็นความเค้นเฉือน เรียกว่าความเค้นของ Reynolds ซึ่งเป็นความเค้นเฉือนในแนวราบระหว่างชั้นของน้ำ เกิดการเคลื่ อนที่ข้ามไปมาระหว่างชั้นของเหลวด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน จากการที่ระยะทางของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งสั้นกว่า ทำให้องค์ประกอบของแนวดิ่งมีอิทธิพลต่อความปั่นป่วนมากกว่าในทิศทางตามยาวและตามขวาง ทำให้สมการการเคลื่อนที่ของน้ำเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} = 0 \qquad (16)$$

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(u^{-2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{u}\overline{v}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{u}\overline{w}\right) + g\frac{\partial z_w}{\partial x} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \qquad (17)$$

$$\frac{\partial \overline{v}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{u}\overline{v}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v^{-2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{v}\overline{w}\right) + g\frac{\partial z_w}{\partial y} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \qquad (18)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ $\tau_{xz} = -\rho\overline{u'}\overline{w'}$ และ $\tau_{yz} = -\rho\overline{v'}\overline{w'}$ ในการแก้สมการมีความจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เขียนได้ดังนี้

ที่ท้องน้ำ ($z = z_b$) ไม่มีองค์ประกอบในทิศทางตั้งฉาก ดังนั้น

$$u\frac{\partial z_b}{\partial x} + v\frac{\partial z_b}{\partial y} - w = 0 \qquad (19)$$

ที่ผิวน้ำ ($z = z_w$) ไม่มีองค์ประกอบของความเร็วสัมผัส คือน้ำไม่ไหลข้ามออกไปจากผิวได้ ดังนั้น

$$\frac{\partial z_w}{\partial t} + u\frac{\partial z_w}{\partial x} + v\frac{\partial z_w}{\partial y} - w = 0 \qquad (20)$$

นอกจากนั้นแล้ว ที่ผิวน้ำความดันคงที่และไม่มีความเค้นเฉือน คือ

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \qquad (21)$$

เมื่อทำการหาปริพันธ์ของสมการ (16) ถึง (18) ตลอดทั้งความลึกของการไหลภายใต้เงื่อนไขขอบเขตตามสมการ (19) ถึง (21) ทำให้ได้สมการควบคุมการไหล 2 มิติตามแนวราบเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \qquad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha_1 hU^2\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\alpha_2 hUV\right) + gh\frac{\partial z_w}{\partial x} + \frac{\tau_{xz}}{\rho} = 0 \qquad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hV) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha_2 hUV\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\alpha_3 hV^2\right) + gh\frac{\partial z_w}{\partial y} + \frac{\tau_{yz}}{\rho} = 0 \qquad (24)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในสมการ (22) ถึง (24) ได้ตัดเครื่องหมาย "-" ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยทิ้งไป เนื่องจากองค์ประกอบของความเร็วที่เฉไปจากค่าเฉลี่ยจะไม่นำมาพิจารณาอีกต่อไป ดังนั้น u และ v ในสมการ (22) ถึง (24) จึงเป็นความเร็วเฉลี่ยตลอดความลึก เขียนได้ดังนี้

$$u = \frac{1}{h}\int_{z_b}^{z_w} u dz \, , \; v = \frac{1}{h}\int_{z_b}^{z_w} v dz \tag{25}$$

เมื่อ $h = z_w - z_b$ คือความลึกของการไหล τ_{xz} , τ_{yz} คือองค์ประกอบของความเค้นเฉือนที่ท้องน้ำ และสัมประสิทธิ์ α_1, α_2, α_3 ใช้ในการปรับแก้จากการที่ค่าเฉลี่ยของผลคูณของตัวแปรสองตัวย่อมไม่เท่าผลคูณของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสองตัวนั้น ค่าสัมประสิทธิ์นี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบการกระจายความเร็ว โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0-1.1 ซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไปสามารถตัดทิ้งได้

สำหรับกรณีหน้าตัดทางน้ำอย่างง่ าย การหาปริพันธ์ของสมการ (22) ถึง (24) ตลอดความกว้างของทางน้ำจะได้สมการควบคุมการไหลในหนึ่งมิติ ดังนี้

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \text{ หรือ } B\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{26}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha' \frac{Q^2}{A}\right) + gA\frac{\partial z_w}{\partial x} + \frac{\tau_b P}{\rho} = 0 \tag{27}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดขวางการไหล Q คือ อัตราการไหล B คือความกว้างของทางน้ำที่ผิวน้ำ τ_b คือความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่ท้องน้ำ P คือเส้นขอบเปียก และสัมประสิทธิ์ α' มีค่าเป็นหนึ่งสำหรับการไหลแบบสม่ำเสมอ สำหรับกรณีทางน้ำกว้างที่มีความกว้างคงที่และจากการสมมติให้ความต้านทางการไหลเนื่องจากแรงเสียดทานแสดงได้สูตรของ Chezy จะได้สมการควบคุมการไหลดังนี้

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u\frac{\partial h}{\partial x} + h\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \tag{28}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + g\frac{\partial h}{\partial x} + g\frac{\partial z_b}{\partial x} + g\frac{|u|u}{C^2 h} = 0 \tag{29}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ C สัมประสิทธิ์ของ Chezy และ $h = z_w - z_b$ คือความลึกของการไหล

สำหรับกรณีของแม่น้ำที่มีหน้าตัดประกอบ (Composite cross-section) คือมีหน้าตัดบางส่วนที่ไม่สามารถลำเลียงน้ำได้อาจเนื่องมาจากการมีสิ่งปลูกสร้างรุกล้ำทางน้ำ ความสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัด เมื่อความลึกการไหลคงที่ เป็นดังนี้

$$\frac{\partial A_s}{\partial x} = B_s \frac{\partial h}{\partial x} = \left.\frac{\partial A_s}{\partial x}\right|_{h=constant} \quad (30)$$

เมื่อ A_s คือพื้นที่หน้าตัดผสมส่วนที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้ B_s คือความกว้างของทางน้ำเฉพาะในส่วนที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้ และเมื่ออาศัยความสัมพันธ์

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A_s}\right) = 2\frac{Q}{A_s}\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{A_s^2}\frac{\partial A_s}{\partial x} = -\frac{2Q}{A_s}\frac{\partial A}{\partial t} - \frac{Q^2}{A_s^2}\left(B_s\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial A_s}{\partial x}\right) \quad (31)$$

ทำให้สมการควบคุมการไหลของแม่น้ำที่มีหน้าตัดประกอบ เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - \alpha'\frac{2Q}{A_s}\frac{\partial A_s}{\partial t} + gA_s\left(1 - \alpha'\frac{Q^2 B_s}{gA_s^3}\right)\frac{\partial h}{\partial x}$$

$$-\alpha'\frac{Q^2}{A_s^2}\frac{\partial A_s}{\partial x} + gA_s\frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_b P}{\rho} = 0 \quad (33)$$

จากการที่กล่าวมาในหัวข้อนี้ จะเห็นได้ว่าสมการควบคุมหรือสมการการเคลื่อนที่ ไม่ว่าจะเป็นเป็นการจำลองการไหลแบบหนึ่ง สองหรือสามมิติ จะประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัม ที่ความสัมพันธ์อันซับซ้อน ไม่สามารถแก้สมการเพื่อหาคำตอบของตัวไม่รู้ค่า อันได้แ ก่ อัตราการไหล และพื้นที่ตัดขวางการไหล หรืออีกนัยหนึ่งคือ ความเร็วและความลึกการไหลนั่นเอง ในการหาคำตอบนี้ จำเป็นต้องอาศัยเทคนิคเชิงตัวเลข (Numerical

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

technique) เพื่อหาคำตอบทางอ้อม โดยอาศัยคอมพิวเตอร์ที่ปัจจุบันมีความเร็วในการประมวลผลสูง

6. แบบจำลองคณิตศาสตร์

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในแม่น้ำธรรมชาติคือ การเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพของทางน้ำที่มีสาเหตุมาจากกระบวนการกัดเซาะและการทับถมในแม่น้ำ กระบวนการนี้มีความซับซ้อน เนื่องจากขอบเขตของแม่น้ำมีความร่วนไม่ยึดติดแน่น เมื่อกระแสน้ำไหลผ่านชั้นขอบเขตจึงเกิดการเคลื่อนตัวของตะกอน ทำให้รูปร่างของแม่น้ำเปลี่ยนแปลงไปตามเส้นทางการไหลของน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบต่างๆในแม่น้ำ ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพลำน้ำนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสามารถคาดการณ์ หรือประเมินให้ได้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการป้องกันปัญหาต่างๆ โดยเค รื่องมือที่ใช้ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงของแม่น้ำที่มีประสิทธิภาพสูงในปัจจุบันได้แก่แบบจำลองคณิต ศาสตร์ เนื่องจากคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาประสิทธิให้สูงขึ้นเป็นอย่างมาก และยังมีหน่ วยความจำมาก ช่วยให้การคำนวณเป็นไปอย่างรวดเร็ว รวมถึงความสามารถแสดงผลการคำนวณในรู ปแบบของคอมพิวเตอร์กราฟิก ที่ช่วยให้มองเห็นขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆอย่างชัดเจน (ชัยยุทธ, 2550)

6.1 แนวความคิด (Concepts)

6.1.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ที่ดีต้องสามารถบรรยายถึงกระบวนการทางกายภาพที่เป็นจริง และให้คำตอบเชิงตัวเลขจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งได้จากการแก้สมการทั้งหมดไปพร้อมๆ กับเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม และจากความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการไหลแบบปั่นป่วน สมการเชิงอนุพันธ์ในปัญหาด้านกลศาสตร์ข อง แม่น้ำ โดยทั่วไปอยู่ในรูปของสมการอนุรักษ์มวลสารและโมเมนตัม ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรอิสระ 2 ตัว คือ ระยะห่างและเวลา (Space and time) ข้อมูลภาคสนามที่เก็บอย่างต่อเนื่องด้วยความละเอียดถูกต้องจะใช้เพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Initial and boundary conditions) ของการคำนวณในแบบจำลอง ดังนั้นเมื่อมีการผันแปรเงื่อนไขขอบเขตอย่างหลากหลาย จึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองแตกต่างกันเป็นจำนวนมาก กล่าวได้ว่า แบบจำลองช่วยให้ผู้ที่กำลังศึกษาได้เห็นภาพหรือผลที่จะเกิดขึ้นในภายหลังจากการพัฒนาโครงการที่จะมีขึ้นนั่นเอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.1.2 ในแ บบจำลองคณิตศาสตร์ ข้อมูลภาคสนามหรือจากในห้องปฏิบัติการในช่วงเวลาหนึ่งจะถูกนำมาใช้ในการปรับเทียบแบบจำลอง (Model calibration) ในขณะที่ข้อมูลส่วนที่เหลือนำมาใช้ในการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model verification) ในขั้นตอนของการปรับแก้แบบจำลองจะเกี่ยวข้องกับการปรับ พารามิเตอร์ที่บรรยายถึงแรงเสียดทานการไหล เพื่อให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับค่าที่เก็บวัดได้ในสนาม ซึ่งช่วงของค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับนี้ต้องมีความเหมาะสมกับคุณสมบัติทางกายภาพของพฤติกรรมการไหลนั้นด้วย จากนั้นค่าตัวเลขพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนการปรับแก้แบบจำล องเหล่านี้จะนำมาใช้ในการพิสูจน์แบบจำลองกับช่วงเวลาของข้อมูลที่เหลือ แบบจำลองจะได้รับความเชื่อมันก็ต่อเมื่อให้ผลการคำนวณในขั้นตอนนี้ สอดคล้องกับข้อมูลภาคสนามที่นำมาใช้ แบบจำลองที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีเหตุมีผล (Validation) จะต้องให้ผลการคำนวณที่มีความล ะเอียดแม่นยำเมื่อเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จากภาคสนาม หลังจากที่แบบจำลองผ่านขั้นตอนการทดสอบแล้วก็จะสามารถนำไปใช้เพื่อทำนายภายใต้เงื่อนไขอื่นได้อีกด้วย เช่น สามารถนำไปทำนายเหตุการณ์ที่ยังไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อนเป็นต้น

6.1.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถแบ่งตามมิติข องทิศทางออกเป็น แบบหนึ่งมิติ แบบสองมิติ และแบบสามมิติ การนำแบบจำลองชนิดใดไปใช้จึง ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และข้อจำกัดที่มีอยู่ สำหรับแบบจำลองหนึ่งมิติ (One-dimension model) เป็นการใช้ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ของการไหลและของตะกอนที่แต่ละหน้าตัดตามขวางการไหลให้เป็นฟังก์ชั่นของเวลาและสถานที่ต่างๆ แบบจำลองชนิดนี้ใช้พิกัดตามยาวในทิศทางการไหลของน้ำเป็นมิติของสถานที่ นอกจากนี้ยังมีแบบจำลองประเภทกึ่งสองมิติที่ช่วยในการทำนายการเปลี่ยนแป ลงทางด้านข้างได้โดยอาศัยหลักการแบ่งช่องการไหลออกเป็นท่อย่อยๆ โดยใช้ เวลาในการประมวลผลพอๆ กับแบบจำลองแบบหนึ่งมิติ (Yang *et al.*, 2000)

6.1.4 แบบจำลองสองมิติ (Two-dimension model) ใช้ในการทำนายการไหล อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนและการกัดเซาะในแม่น้ำที่มีพื้น ที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึงอยู่ติดกับแม่น้ำซึ่งมีการไหลด้านข้างเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย การไหลของน้ำจึงมีทั้งไปในแนวยาวและแนวขวางนอกจากนี้ยังใช้พื้นที่บริเวณส่วนปลายแม่น้ำที่ต่อเนื่องกับทะเลหรือมหาสมุทร รวมถึงพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลอีกด้วย แบบจำลองแบบสองมิติในแนวน อน (2D horizontal model) อยู่บนพื้นฐานของสมการเฉลี่ยความลึกการไหลของน้ำ จึงสามารถใช้ทำนายกระบวนการเปลี่ยนแปลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ของแม่น้ำได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์หลักที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง ตัวอย่างความสามารถเฉพาะด้านของแบบจำลองสองมิติได้แก่

ก. การทำนายการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำในแม่น้ำ ภายใต้สภาวะการไหลแบบคงที่

ข. การทำนายการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำในแม่น้ำ ภายใต้สภาวะการไหลแบบไม่คงที่

ค. การเลียนแบบกระบวนการพัฒนาความโค้งของแม่น้ำ ภายใต้การไหลแบบคงที่

ง. รูปแบบทางราบของแม่น้ำ ภายใต้การไหลแบบคงที่

จ. กระบวนการแบ่งแยกตะกอนที่ตกทับถมที่ท้องน้ำและที่บริเวณส่วนโค้งของแม่น้ำภายใต้สภาวะการไหลแบบคงที่

6.1.5 สำหรับแบบจำลองสามมิติ (Three-dimension model) มีจุดเด่นที่ช่วยให้เห็นถึงรายละเอียด ของการไหล แสดงถึงการไหลแบบหมุนวน และการไหลแบบปั่นป่วนได้อย่างดี อย่างไรก็ตาม แบบจำลองประเภทนี้ไม่ได้ให้รายละเอียดของการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และต้องการเวลาในการประมวลผลที่นานมาก ดังนั้น แบบจำลองชนิดนี้ จึงมักนำไปใช้ในการทำนายอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอน และการกัดเซาะท้องน้ำเฉพาะบริเวณที่ สนใจ ที่สภาพการไหลเป็นแบบปั่นป่วนสูง มีกระแสไหลวน มีการกัดเซาะและการทับถมของตะกอน เฉพาะแห่งอย่างรุนแรง เช่นการไหลบริเวณบริเวณโค้งของแม่น้ำ การไหลแบบเจ็ท การไหลบริเวณท่าเรือที่ยื่นเข้าไปในแม่น้ำ เป็นต้น ความเหมาะสมของการนำแบบจำลองสามมิติไปใช้งานจึงอยู่ในช่ว ง ระยะเวลาสั้นๆ ของช่วงเริ่มต้นของโครงการพัฒนาเท่านั้น ซึ่งในช่วงกลางและช่วงท้ายมีการเปลี่ยนแปลงช้า ต้องการเวลาในการพัฒนารูปแบบลักษณะท้องน้ำ รวมถึงความไม่แน่นอนและความซับซ้อนจากอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา

7.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้เลือกแบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21 (DHI, 2007) มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาเพื่อจำลองการไหลของแม่น้ำ โดยแบบจำลองดังกล่าว เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นโดย DHI Water Environment and Health ซึ่งแบบจำลองจะกล่าวถึงการไหลของน้ำที่มีลักษณะเป็น 2ทิศทาง ซึ่งการแปรผันในแนวดิ่งไม่มีหรือมีน้อย โดยอยู่ภายใต้อิทธิพลของน้ำขึ้นและน้ำลง ใช้ประโยชน์ในการจำลองสภาพทางชลศาสตร์ที่สัมพันธ์กับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในทะเลสาบ ปากแม่น้ำ อ่าว พื้นที่ชายฝั่งทะเล และทะเลปิด

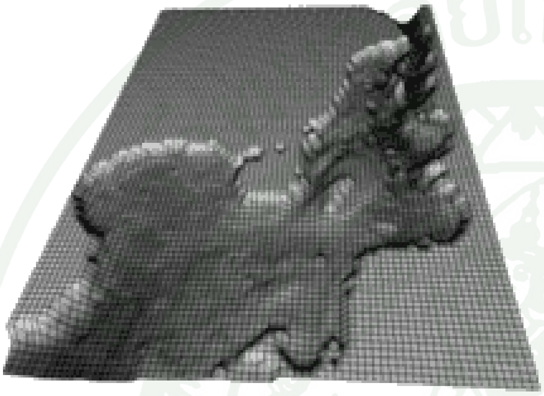
MIKE21 ได้จัดเตรียมไว้สำหรับการออกแบบทางด้านวิศวกรรม และมีลักษณะเฉพาะเป็นแบบจำลองที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพแวดล้อม และเป็นซอฟแวร์ที่ง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งเหมาะสำหรับการศึกษาทางด้านต่างๆ ได้แก่

- วิศวกรรมชายฝั่งทะเลและสมุทรศาสตร์
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและชลศาสตร์ในทะเล
- การเคลื่อนตัวของตะกอน
- การวิเคราะห์คลื่นในทะเล
- การเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง

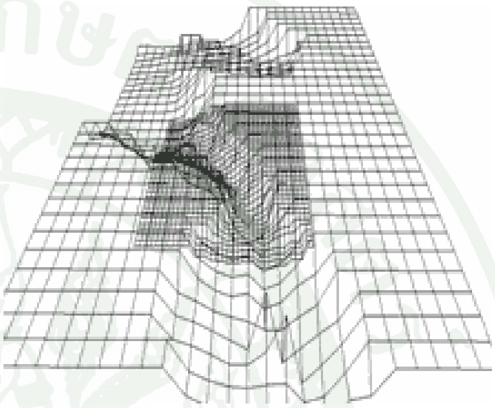
แบบจำลอง MIKE21 ได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างภูมิประเทศใต้ท้องทะเล (Bathymetry) แบ่งออกเป็น 4 แบบ ประกอบด้วย Single Grid, Multiple Grids, Curvilinear Grid และ Flexible Mesh ดังแสดงในภาพที่ 12 โดยในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกใช้ Flexible Mesh ซึ่งนับว่าเป็นเครื่องมือใหม่ล่าสุดที่ถูกพัฒนาขึ้นและเริ่มนำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรมชายฝั่งทะเล (Coastal Engineering) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 เป็นต้นมา โดยมีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในการจำลองแบบการไหลให้ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาที่มีขนาดกว้างใหญ่และมีความซับซ้อน ซึ่งอาจจะมีความละเอียด (resolution) ของข้อมูลภูมิประเทศใต้ท้องทะเล (Bathymetry) ที่แตกต่างกัน กล่าวคือสามารถวิเคราะห์แบบลงรายละเอียดโดยเน้นเฉพาะพื้นที่บางแห่งที่มีข้อมูลละเอียดกว่าอีกพื้นที่หนึ่งซึ่งอยู่ภายในพื้นที่ศึกษาเดียวกันได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

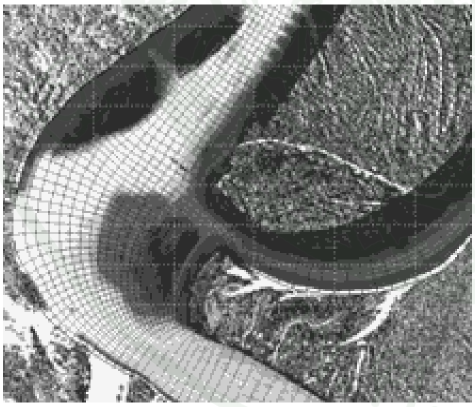
สำหรับ Flexible Mesh ที่สร้างขึ้นสำหรับแบบจำลองการไหลแบบ 2 มิตินั้นแบ่งออกเป็นสองแบบคือ Triangles และ Quadrilateral Element ส่วนถ้าต้องการจำลองแบบการไหลแบบ 3 มิตินั้นจะต้องเพิ่มในส่วนของ Prism หรือ Brick Element เข้ามาพิจารณาด้วย ดังแสดงตัวอย่างของ Mesh ในแบบ 3 มิติในภาพที่ 13



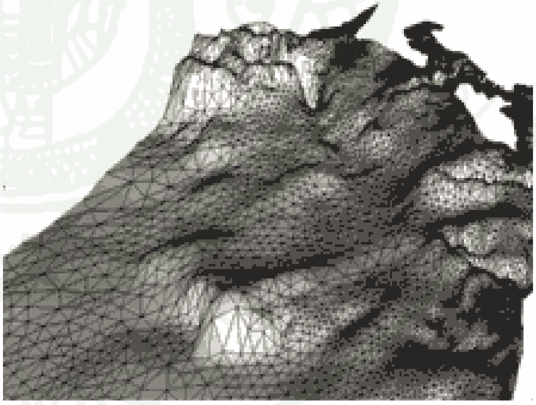
(ก) Single Grid



(ข) Multiple Grids



(ค) Curvilinear Grid

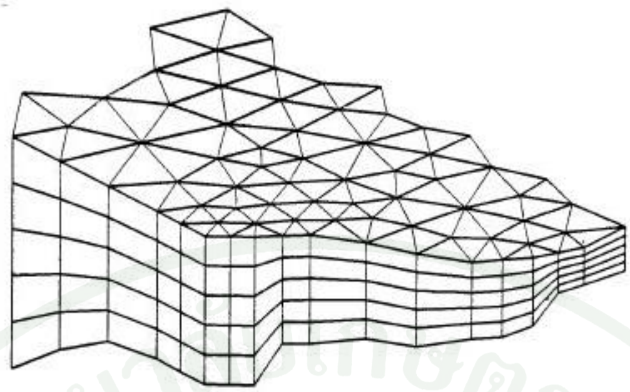


(ง) Flexible Mesh

ภาพที่ 12 ประเภทของการสร้าง Bathymetry

ที่มา: DHI (2008)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

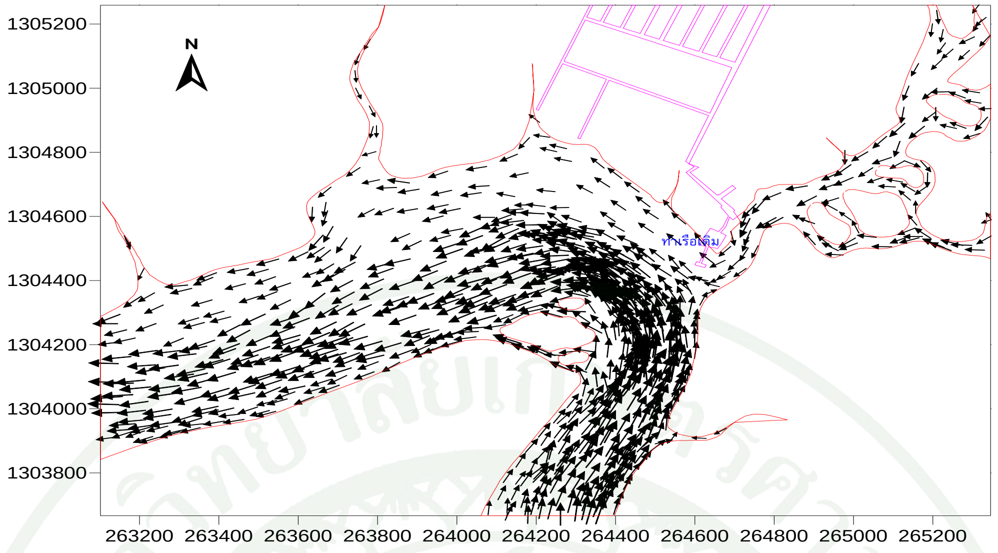


ภาพที่ 13 ตัวอย่างของการสร้าง Mesh แบบ 3 มิติ

ที่มา: DHI (2008)

โดยในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21 มาประยุกต์ใช้ในการศึกษา เพื่อดำเนินการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำในพื้นที่โครงการด้วยแบบจำลองการไหลสองมิติ ซึ่งใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกระแสน้ำ ดังแสดงใน ภาพที่ 14 ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอนอันเนื่องจากกระแสน้ำ อย่างไรก็ตาม เพื่อความถูกต้องแบบจำลองฯ จะต้อ งถูกทำการเปรียบเทียบ ผลการตรวจวัดกระแสน้ำจริงในภาคสนามก่อน สำหรับทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการจัดทำแบบจำลองการไหลสองมิติ MIKE21 ประกอบด้วยโมดูลต่างๆ ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 14 ตัวอย่างผลการจำลองสภาพกระแสน้ำ

7.1.1 โมดูลทางชลศาสตร์ (Hydrodynamics Module : HD)

โมดูลทางชลศาสตร์จะเป็นโมดูลพื้นฐาน สำหรับการคำนวณในโมดูลอื่นๆ ที่เกี่ยวกับกระบวนการตกตะกอน และชลศาสตร์สิ่งแวดล้อม โดยที่โมดูลทางชลศาสตร์เป็นการจำลอง ระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง และการไหลที่สอดคล้องกับแรงอื่นที่กระทำในทะเลสาบ ปากแม่น้ำ และพื้นที่ชายฝั่ง โดยแ บ่งพื้นที่เป็น Mesh สามเหลี่ยม และคำนวณระดับน้ำและการไหลในแต่ละ Mesh โดยมีการความลึก สัมประสิทธิ์ความต้านทานที่ท้องน้ำ สนามลม และเงื่อนไขขอบเขตด้านอุทกพลศาสตร์

7.1.2 โมดูลการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย (Sand Transport : ST)

โมดูลการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย จะใช้กำหนดอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย เนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำเพียงอย่างเดียว หรือรวมผลจากการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ และคลื่นในพื้นที่ท้องน้ำที่มีทราย

7.2 สำหรับรายละเอียดในแต่ละโมดูลของแบบจำลอง MIKE21 ประกอบด้วย

7.2.1 โมดูลทางชลศาสตร์ (Hydrodynamics Module : HD)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โมดูลทางชลศาสตร์ (HD-Module) เป็นโมดูลพื้นฐาน ในการใช้แบบจำลอง MIKE21 ต้องมีการจัดเตรียมข้อมูลชลศาสตร์ ก่อนที่จะใช้ในโมดูลอื่นๆ เช่น โมดูลการพัดพา - การแพร่กระจาย (AD-Module) โมดูลคุณภาพน้ำ (WQ-Module) และโมดูลการเคลื่อนที่ของตะกอน (ST-Module) ที่ต้องมีการจัดเตรียมข้อมูล จากโมดูลทางชลศาสตร์ (HD-Module) ทั้งสิ้น

โมดูลทางชลศาสตร์เป็นการจำลองการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ และการไหลที่ตอบสนองต่อการควบคุมพฤติกรรมการไหลของน้ำแบบ 2ทิศทาง (Two dimentional) มีสมการควบคุมการไหลคือ Navie-Stokes Equation โดยมีสมมติฐานกล่าวคือ การไหลไม่มีการยุบอัดตัว (Incompressible Fluid) การแปรผันในแนวดิ่งมีน้อย และไม่มีการแบ่งชั้นของน้ำ สมการที่ใช้แก้ปัญหา คือ สมการต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัม ทั้งแกน x และ y โดยใช้วิธี Implicit Finite Diffrence แสดงได้ดังสมการที่ (34) (35) และ(36)

สมการความต่อเนื่อง:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial q}{\partial y}=\frac{\partial d}{\partial t} \qquad (34)$$

สมการโมเมนตัม ทิศทาง x :

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial x}+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2\cdot h^2}$$

$$-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{xy}\right)\right]-\Omega_q-fVV_x+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial x}\left(p_a\right)=0 \qquad (35)$$

สมการโมเมนตัม ทิศทาง y :

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial y}+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2\cdot h^2}$$

$$-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{yy}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xy}\right)\right]+\Omega_p-fVV_y+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial xy}\left(p_a\right)=0 \qquad (36)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ $h(x,y,t)$ = ความลึกน้ำ ($=\zeta - d$, m)

$d(x,y,t)$ = ความลึกน้ำที่แปรผันตามเวลา (m)

$\zeta(x,y,t)$ = ระดับผิวน้ำเหนือระดับอ้างอิง (m)

$p(x,y,t)$ = ความหนาแน่นของการไหลในทิศทางแกน x ($m^3/s/m$)

$q(x,y,t)$ = ความหนาแน่นของการไหลในทิศทางแกน y ($m^3/s/m$)

$C(x,y)$ = ความต้านทานของ Chezy ($m^{1/2}/s$)

g = ความเร่งเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

$f(V)$ = ความฝืดเนื่องมาจากลม

$V, V_x, V_y(x,y,t)$ = ความเร็วลมและความเร็วในทิศทางแกน x,y (m/s)

$\Omega(x,y)$ = สัมประสิทธิ์คอริออริส (s^{-1})

$p_a(x,y,t)$ = ความดันอากาศ ($kg/m/s^2$)

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

t = เวลา (s)

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = แรงแอนประสิทธิผลในทิศทาง x และ y

ก. ปัจจัยในการปรับแก้

มี 3ปัจจัยในการปรับแก้ คือความต้านทานที่พื้น (C) ความฝืดเนื่องจากลม (f) และสัมประสิทธิ์การกระจายโมเมนตัม (E) หรือสัมประสิทธิ์การไหลวน ซึ่งการปรับแก้ของแบบจำลองจะทำได้ง่าย ในทางปฏิบัติการปรับแก้ของแบบจำลองขึ้นอยู่กับ ความถูกต้องของข้อมูล เช่น การวัดความลึก ขอบเขตของข้อมูล และความเร็วลม

ความต้านทานที่พื้น (C) และสัมประสิทธิ์การกระจายโมมนตัม (E) เป็นตัวกำหนดฟังก์ชั่นของระยะทาง และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายโมเมนตัม (E) จะแปรผันตามเวลา ซึ่งจะเห็นได้จากทฤษฎี สมอกอรินสกี้ (Smogorinky's Theory) สำหรับการไหลไหลปั่นป่วน

ข. ข้อมูลที่ต้องการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1) พารามิเตอร์พื้นฐาน

- ขนาดของกริดและขอบเขต
- ช่วงเวลาและความยาวของการจำลอง
- ชนิดของผลที่ต้องการและความถี่
- ตำแหน่ง

2) การวัดความลึก

3) ปัจจัยในการปรับแก้

- ความต้านทานที่พื้น
- สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายโมเมนตัม
- ความฝืดเนื่องจากลม

4) เงื่อนไขเริ่มต้น

- ระดับผิวน้ำ
- ความหนาแน่นของการไหล (Flux Density)

5) เงื่อนไขขอบเขต

- ระดับน้ำและปริมาณการไหล
- ทิศทางการไหล

6) เงื่อนไขขอบเขต

- ความเร็วและทิศทางลม
- ความเร็วที่แหล่งกำเนิดและที่หายไป
- ปริมาณและความเร็วการไหลที่แหล่งกำเนิด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7.2.2 โมดูลการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย (Sand Transport : ST)

ก. หลักการที่สำคัญในการคำนวณการเคลื่อนที่ของตะกอน มีดังนี้

1) มวลสารสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง โดยที่การเคลื่อนที่ในแนวราบ มีความสัมพันธ์กับการไหลเวียนของกระแสน้ำ (Advection) ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง มีความสัมพันธ์กับกระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) และกระบวนการแพร่กระจาย (Dispersion) เป็นหลัก

2) สารแขวนลอย (Suspension) ของมวลสาร มีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสง

3) มวลสารมีคุณสมบัติการสลายตัวแบบเป็นเส้นตรง (First Order Decay) หลักการคำนวณจะเริ่มต้นด้วยการพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของมวลสาร ในแนวราบจากจุดกำเนิดตะกอน โดยอาศัยผลการคำนวณการไหลเวียนในแนวราบเป็นหลัก ในขณะเดียวกันจะคำนวณการเคลื่อนที่ของมวลสารในแนวดิ่ง โดยหักลบมวลสารที่ตกตะกอนลงสู่ท้องน้ำออก ผลการคำนวณที่ได้ คือ ลักษณะการแพร่กระจายของมวลสารในแนวราบตามที่ต้องการ

ข. รายละเอียด และทฤษฎีที่ใช้ในแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน มีดังนี้

1) ขนาด และส่วนคละของตะกอน

MIKE21-ST สันนิษฐานว่าวัสดุที่ท้องน้ำ มีรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีขนาดการกระจายตัวแบบ Log-normal ด้วยวิธี Grading curve สามารถสร้างได้ ขึ้นอยู่กับสองพารามิเตอร์ คือ ขนาดอนุภาค (d) (บางครั้งอาจใช้ d_{50}) และการเบี่ยงแบนมาตรฐานทางเลขาคณิต (σ_g) หาได้จาก

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \tag{37}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซึ่ง d_{16} และ d_{84} หมายถึงขนาดของตะกอนที่ยังมีตะกอนขนาดตะกอนเล็กกว่าอยู่อีก 16% และ84% โดยน้ำหนัก

2) ขนาดอนุภาค (mm) และการเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิต สามารถกำหนดได้ 2ทางเลือก คือ

- ให้ d เป็นค่าคงที่ และ σ_g ได้จากการจำลองทั้งพื้นที่
- ทั้ง 2พารามิเตอร์ถูกกำหนดค่าในกริดทุกกริด

หากเลือกที่จะระบุขนาด และส่วนคละของตะกอน ใน MIKE21-ST โดยให้ทั้ง 2รายการเป็นข้อมูลนำเข้า ให้ขนาดอนุภาคขนาดกลาง (mm) เป็นรายการแรก และรายการที่สองเป็นการเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิต ซึ่ง ขนาดอนุภาคขนาดกลางที่ระบุลงไปควรอยู่ในขอบเขตสำหรับทราย และกำหนดให้วัสดุท้องน้ำสม่ำเสมอ $(\sigma_g = 1)$ ถ้าหากไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนเกิดขึ้น ให้กำหนดขนาดอนุภาคเท่ากับ -99 $(d = -99)$

3) ความพรุน

ความพรุนของวัสดุท้องน้ำ (n) จะต้องระบุเ ป็นค่าคงที่สำหรับพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งใช้ตะกอนที่ปราศจากแรงยึดติด (Non-cohesive sediment) ในการคำนวณ โดยที่ค่าปกติสำหรับตะกอนทราย (n = 0.40) จะถูกนำมาเป็นค่าเริ่มต้นในแบบจำลอง MIKE21-ST

4) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตะกอน

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตะกอนท้องน้ำ (s) ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของตะกอน (ρ_s) และความหนาแน่นของน้ำ (ρ)

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \qquad (38)$$

สูตรการเคลื่อนที่ของตะกอนโดยใช้ MIKE21 ST ที่ถูกพัฒนาสำหรับเพื่อหาตะกอนทราย ซึ่งความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตะกอนควรจะอยู่ในช่วง 2.50-2.70

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5) ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Engelund และHansen

ตัวแปรไร้มิติของการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำรวม (Φ_t) หาได้จาก

$$\Phi_t = 0.1\frac{C^2}{2g}\theta^{2.5} \tag{39}$$

เมื่อ C = ค่าความขรุขระท้องน้ำของ Chezy และ

$$\Phi_t = \frac{q_t}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \tag{40}$$

เมื่อ q_t คือการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำรวม และ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก ตัวแปรไร้มิติของความเร็วเนื่องจากแรงเฉือน (θ) หาได้จาก

$$\theta = \frac{U_f^2}{(s-1)gd} \tag{41}$$

ซึ่ง U_f คือความเร็วเนื่องจากแรงเฉือน , d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตะกอน และ s คือความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ

สมมติว่าตัวแปรไร้มิติของความเร็วเนื่องจากแรงเฉือน (θ) มีค่ามากกว่า Shields Parameter ในช่วงเริ่มต้นของการการเคลื่อนที่ของตะกอน (θ_c) ค่าของ (θ_c) ถูกกำหนดโดยผู้ใช้งาน บางครั้งขึ้นอยู่กับการแปรเปลี่ยนของตะกอนท้องน้ำ เนื่องจากทฤษฎีของ Engelund และHansen ใช้ d_{50} เฉลี่ยในการคำนวณ

6) ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Engelund และ Fredsøe

การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำรวม (q_t), คำนวณได้จากผลรวมของการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (q_b) และการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย (q_s)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$q_t = q_b + q_s \quad (42)$$

สันนิษฐานว่า การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำจะเกิดขึ้น ความหนาจะเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดตะกอน การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (q_b) หาได้จาก

$$q_b = 5p\left(\sqrt{\theta'} - 0.07\sqrt{\theta_c}\right)\sqrt{(s-1)gd} \quad \text{if } \theta' > \theta_c \quad (43)$$

เมื่อ p คือความน่าจะเป็นของอนุภาคเดียวทั้งหมดที่เคลื่อนไหว หาได้จากสมการ (44), θ' คือตัวแปรไร้มิติของความเค้นเฉือนท้องน้ำ หาได้จากสมการ (45), θ_c คือความเค้นเฉือนวิกฤตที่ท้องน้ำสำหรับการเคลื่อนตัวเริ่มต้น และ s คือความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตะกอนท้องน้ำ

$$p = \left[1 + \left[\frac{\frac{\pi}{6}\beta}{\theta' - \theta_c}\right]^4\right]^{-1/4} \quad (44)$$

เมื่อ β คือค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานแบบไดนามิก

$$\theta' = \frac{U_f'^2}{(s-1)gd} \quad (45)$$

ตามแนวคิดของ Einstein การเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย q_s หาจาก

$$q_s = 11.6U'_f c_b a\left[I_1 \ln\left(\frac{30h}{k_N}\right) + I_2\right] \quad (46)$$

เมื่อ c_b คือความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยท้องน้ำ , U'_f คือความเร็วเนื่องแรงเฉือน ที่เกี่ยวกับแรงเสียดทานของผิว , $a = 2b =$ ระดับอ้างอิงสำหรับ c_b, I_1 และ I_2 คือ Einstein's Integrals, h คือความลึกน้ำ และ k_N คือความขรุขระของ Nikuradse $= 2.5d$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Integrals ของ I_1 และ I_2 คือตัวแปรไร้มิติของระดับอ้างอิง , $A = a/h$ คือ Rouse number, $z = w_s / kU_f$,ซึ่ง w_s คือความเร็วการตกตะกอนของตะกอนแขวนลอย และ k = ค่าคงที่ von Karman's (≈ 0.40), I_1 และ I_2 เป็นปริพันธ์ระหว่าง $y = a$ และ $y = h$, ซึ่ง y คือระดับน้ำที่วัดจากผิวน้ำถึงท้องน้ำ

Engelund และ Fredsøe พัฒนาความสัมพันธ์กึ่งเชิงประจักษ์ (semi-empirical) สำหรับค่า c_b เมื่อ $a = 2d$

$$c_b = \frac{0.65}{(1 + 1/\lambda)^3} \tag{47}$$

ซึ่งค่า λ, linear concentration กำหนดเป็น

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{\theta' - \theta_c - \frac{\pi p \beta}{6}}{0.027 s \theta'} \right)} \quad \text{if } \theta' > \theta_c + \pi p \beta / 6 \tag{48}$$

7) สมการการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Zyserman และFredsøe

วิธีการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม (q_t) เหมือนกับทฤษฎีการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Engelund และFredsøe แตกต่างกันที่ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยที่ท้องน้ำ (c_b) คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์เชิงประจักษ์

$$c_b = \frac{A(\theta' - \theta_c)^n}{1 + \frac{A}{c_m}(\theta' - \theta_c)^n} \quad \text{ถ้า } \theta' > \theta_c \tag{49}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ พารามิเตอร์ A, n, θ_c และ c_m เป็นค่าคงที่ มีค่าดังต่อไปนี้

$$A = 0.331$$
$$n = 1.75$$
$$\theta_c = 0.045$$
$$c_m = 0.46$$

8) สมการการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Meyer-Peter และ Muller

ตัวแปรไร้มิติของอัตราการการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (Φ_b) หาได้จาก

$$\Phi_b = 8(\theta' - \theta_c)^{1.5} \tag{50}$$

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \tag{51}$$

เมื่อ θ' คือ Shields Parameter ที่เกี่ยวข้องกับแรงเสียดทานที่ผิว , θ_c คือความเค้นเฉือนวิกฤตที่ท้องน้ำ , g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก และ d คือขนาดตะกอน

9) สมการการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Ackers & White

อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม G_{gr} คำนวณโดย

$$G_{gr} = C\left[\frac{F_{gr}}{A} - 1\right]^m \tag{52}$$

เมื่อ C, m และ A เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงอยู่ในรูปของตัวเลขไร้มิติของขนาดตะกอน D_{gr} ซึ่งหาได้จาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$D_{gr} = d\left[\frac{g(s-1)}{v^2} - 1\right]^{1/3} \qquad (53)$$

เมื่อ d คือขนาดตะกอน, g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, s คือความหนาแน่นตะกอนท้องน้ำ, v คือความหนืดจลศาสตร์ของน้ำ และ F_{gr} คือ การเคลื่อนย้ายของตะกอน ซึ่งหาได้จาก

$$F_{gr} = \frac{U_f^n}{\sqrt{gd(s-1)}}\left[\frac{V}{\sqrt{32\log\left(\frac{10h}{d}\right)}}\right]^{1-n} \qquad (54)$$

เมื่อ U_f คือความเร็วเนื่องจากแรงเสียดทาน , h คือความลึกของน้ำ, V คือความเร็วกระแสน้ำที่ความลึกเฉลี่ย , n คือค่าคงที่ ที่ขึ้นอยู่กับ D_{gr} และอยู่ในช่วง 0 (สำหรับวัสดุเนื้อหยาบ) ถึง 1 (สำหรับวัสดุเนื้อละเอียด) พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ตะกอน G_{gr} ซึ่งหาได้จาก

$$F_{gr} = \frac{Xh}{sd}\left(\frac{U_f}{V}\right)^n \qquad (55)$$

เมื่อ X คือฟลักซ์เชิงมวลของตะกอนต่ออัตราการไหลหนึ่งหน่วย

10) แบบจำลองการเคลื่อนที่ตะกอน STP

DHI's กำหนดโปรแกรมการเคลื่อนที่ของตะกอน (STP) ขึ้น เพื่อจะนำมาใช้ในการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ปราศจากแรงยึดติด (non-cohesive sediment transport) ในคลื่นรวมและกระแสการไหล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

STP เป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอนขั้นสูง เพื่อใช้อธิบายเกี่ยวกับอิทธิพลในกระบวนการการเกิดอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอน เช่น การแพร่กระจายคลื่น arbitration angle ที่เกี่ยวกับกระแสคลื่น , breaking/unbroken waves, plane/ripple-covered bed, uniform/graded sediment และอื่นๆ

11) ความเร็วของการตกตะกอน (W_s)

ความเร็วของการตกตะกอน มีเงื่อนไขดังนี้

$$W_s = \frac{(s-1)gd_{50}}{18\nu} \quad for \quad d_{50} < 0.1mm \tag{56}$$

$$W_s = \frac{\nu}{d_{50}}\left(\sqrt{100 + \frac{(s-1)gd_{50}^3}{\nu^2}} - 10\right) \quad for \quad 0.1 \le d_{50} \le 1mm \tag{57}$$

$$W_s = 1.1\sqrt{(s-1)gd}_{50} \quad for \quad d_{50} > 1mm \tag{58}$$

โดยที่ d_{50} = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน (mm)

s = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตะกอน (kg/m^3)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

ν = ความหนืดของน้ำ, เท่ากับ 1×10^{-6} (m^2/s)

จากสมการ (56) ถึง (58) จะเห็นได้ว่าความเร็วของการตกตะกอน (W_s) แปรผันตามกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน (d_{50}) กล่าวคือ ถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน (d_{50}) มีขนาดใหญ่ ความเร็วของการตกตะกอน (W_s) จะมีค่ามาก แต่ถ้าถ้า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน (d_{50}) มีขนาดเล็ก ความเร็วของการตกตะกอน (W_s) ก็จะมีค่าน้อย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

12) ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Van-Rijn(1984)

Van Rijn ได้เสนอสมการการเคลื่อนที่ข องตะกอนออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

ก) การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (S_{bl})

$$S_{bl} = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \sqrt{(s-1)g \cdot d_{50}^3} \qquad (59)$$

โดยที่ T = ตัวแปรไร้มิติ

$$T = \left(\frac{u'_f}{u_{f,c}}\right)^2 - 1 \qquad (60)$$

u'_f = ประสิทธิภาพของความเร็วเนื่องจากแรงเฉือน

$$u'_f = V \frac{\sqrt{g}}{C'} \qquad (61)$$

$u_{f,c}$ = ความเร็วเนื่องจากแรงเฉือนวิกฤติ (m/s)

$$u_{f,c} = \sqrt{\theta_C (s-1) g d_{50}} \qquad (62)$$

C' = ค่าความขรุขระท้องน้ำของ Chezy

$$C' = 18 \log\left(\frac{4h}{d_{90}}\right) \qquad (63)$$

h = ความลึกน้ำ (m)

D_* = ตัวแปรไร้มิติของการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$D_* = d_{50}\left(\frac{(s-1)g}{\nu^2}\right)^{1/3} \tag{64}$$

θ_C = ค่าความเค้นเฉือนวิกฤติท้องน้ำ (θ_C) เป็นค่าคงที่เท่ากับ0.06

ข) สมการการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย (S_{sl})

$$S_{sl} = f \cdot c_a \cdot V \cdot h \tag{65}$$

โดยที่ f = แฟคเตอร์ปรับแก้ของการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย

c_a = ความเข้มข้นของชั้นตะกอนท้องน้ำ (kg/m^3)

V = ความเร็วการไหล (m/s)

จากสมการ (59) ถึง (65) พบว่า การเคลื่อนที่ของตะกอนขึ้นอยู่กับความเร็วของกระแสน้ำ (V) กับความเร็วของการตะตะกอน (w_s) เพราะฉะนั้นการเคลื่อนที่ของตะกอนจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความเร็วของกระแสน้ำ (V) มีค่ามากกว่าความเร็วของการตะตะกอน (w_s) แต่ถ้าความเร็วของกระแสน้ำ (V) มีค่าน้อยความเร็วของการตะตะกอน (w_s) จะทำให้เกิดการตกตะกอน

จากข้อย่อย 5) ถึงข้อย่อย 12) ผู้ใช้งานแบบจำลองต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับระบบแม่น้ำโดยการทดลองปรับแก้พารามิเตอร์ จนใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง หรือจากห้องปฏิบัติการมากที่สุด

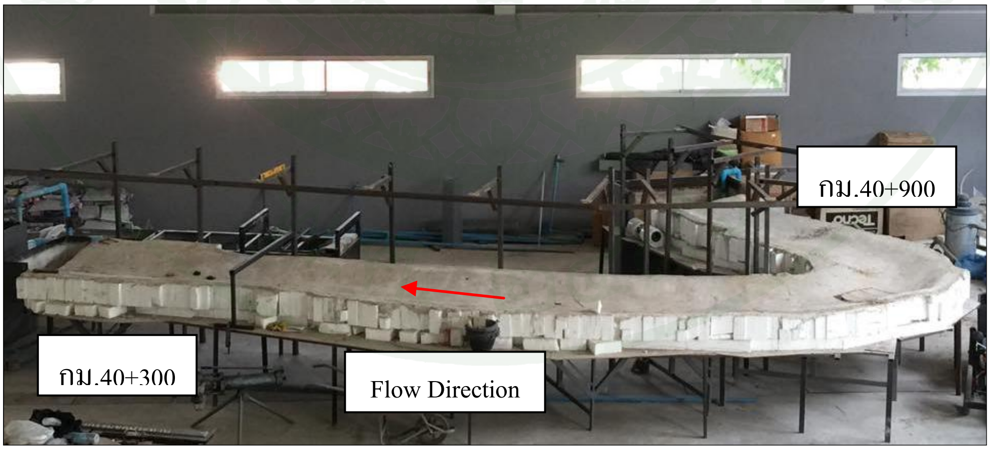
8. แบบจำลองกายภาพของแม่น้ำป่าสัก

จากข้อมูลการสำรวจแม่น้ำป่าสักบริเวณที่มีปัญหาติดตื้น บริเวณ กม. 20+700 ถึง 22+050 และ กม.40+300 ถึง กม.40+900 ลักษณะพื้นที่เป็นบริเวณโค้งน้ำ มีความคดเคี้ยวตามธรรมชาติ ซึ่งพื้นที่ที่มีลักษณะแบบนี้จะมีอิทธิพลต่อการไหลมาก จึงจำเป็นจะต้องสร้างแบบจำลองเพิ่มขึ้นไปทางด้านเหนือน้ำอีกประมาณ 500 ม. ซึ่งได้นำมาสร้างแบบจำลองเหมือนจริงของแม่น้ำป่าสัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตั้งแต่ กม.20+700 ถึง กม.22+350 และ กม.40+300 ถึง กม.41+500 แสดงดังภาพที่ 15 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอนในแม่น้ำป่าสัก โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้พื้นที่อาคารปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมชลประทาน ภาควิชาวิศวกรรมชล ประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม (ศูนย์วิจัยวิศวกรรมและและการจัดการน้ำ, 2557)

ก) ช่วง กม.20+700 ถึง กม. 22+050



ข) ช่วง กม.40+300 ถึง กม. 40+900

ภาพที่ 15 แบบจำลองกายภาพของแม่น้ำป่าสัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบจำลองดังกล่าวนี้ได้กำหนดอัตราย่อส่วน 1: 100 โดยขนาดแบบ จำลองจะมีขนาดกว้างประมาณ 12 ม. และยาว 23 ม. รวมระยะทางตามความย าวลำน้ำของแบบจำลองประมาณ 30 ม.

8.1 วิธีการทดลอง

การทดลองการตกตะกอนในแม่น้ำป่าสักทั้งสองตำแหน่ง ได้ทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 อัตราการไหลคือที่อัตราการไหล 100 ลบ.ม./วินาที และ 500 ลบ.ม./วินาที เพื่อจำลองการไหลในช่วงที่น้ำน้อยและน้ำมาก โดยใช้เวลาทดสอบประมาณ 4.8 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลา 48 ชั่วโมงของเวลาจริง โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบแบบจำลองทั้งในกรณีที่มี เพื่อจำลองปริมาณตะกอนที่เกิดจากการกัดเซาะของฝนตกต่อเนื่องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยตะกอนดังกล่าวนี้จะกำหนดให้เป็นตะกอนที่เคลื่อนที่มาจากด้านเหนือน้ำของบริเวณที่มีปัญหาติดตื้น

ปริมาณการปล่อยตะกอนกำหนดให้มีค่าเท่ากันทั้งในกรณีที่อัตราการไหล 100 ลบ.ม./วินาที และ 500 ลบ.ม./วินาที โดยใช้ขนาดตะกอนเท่ากับ 0.02 มิลลิเมตร (d_{50}) เพื่อให้ได้ค่า Shield number ratio เท่ากับ 1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนประมาณ 1:50 ของตะกอนจริงที่ตรวจวัดค่าได้

8.2 การตรวจวัดประมาณตะกอน

การตรวจวัดปริมาณตะกอนได้ทำโดยใช้ระบบการวิเคราะห์แสงเลเซอร์แบบสามเหลี่ยม ซึ่งเป็นวิธีที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง การตรวจวัดได้เริ่มจากสำรวจระดับของพื้นทางน้ำกรณีที่ไม่มีการตกตะกอนซึ่งจะใช้เป็นค่าระดับพื้นเริ่มต้น หลังจากการทดลองเสร็จ น้ำจะถูกระบายออก จากนั้นทำการสำรวจระดับของพื้นทางน้ำใหม่ ซึ่งระดับใหม่นี้จะมีค่าเปลี่ยนไปเนื่องจากการตกของตะกอน

ข้อมูลต่าง ๆ ได้ถูกนำไ ปแปรค่าการสำรวจด้วยโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้น หลังจากนั้นจะได้ระดับพื้นแม่น้ำที่เพิ่มขึ้นจากการทับถมของตะกอนสำหรับการทดลองแต่ละครั้ง ระดับที่แตกต่างระหว่างพื้นแม่น้ำเดิมและระดับพื้นแม่น้ำที่เพิ่มขึ้นจากการทับถมของตะกอนได้ถูกนำมาซ้อนทับกัน เพื่อคำนวณพื้นที่ที่ตะกอนตกทับถมในบริเวณนั้นได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าการสะสมของตะกอนในแม่น้ำจากแบบจำลองทางกายภาพนั้นเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเร็วของการไหลช้าหรือมีการหมุนวนของการไหลซึ่งเป็นตำแหน่งของโค้งด้านใน ซึ่งเกิดขึ้นในหลายบริเวณ เช่น บริเวณหลังเนิน นอกจากนี้ยังพบว่าความกว้างของหน้าตัดทางน้ำยังมีผลต่อปริมาณการตกตะกอน โดยที่ความกว้างของลำน้ำมากมีโอกาสทำให้การตกตะกอนมีปริมาณมากกว่าหน้าตัดของทางน้ำที่มีขนาดแคบกว่า โดยมีอัตราการตกตะกอนแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 อัตราการตกตะกอนในแม่น้ำป่าสักในแต่ละอัตราการไหลที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองกายภาพ

ผลการทดลอง	**อัตราการตกตะกอน (m/yr)**	
	100 (m^3/s)	**500 (m^3/s)**
แบบจำลองกายภาพ	0.70	0.79

ที่มา: ศูนย์วิจัยวิศวกรรมและและการจัดการน้ำ (2557)

9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บุญลือ (2544) ได้พัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้นเพื่อวิเคราะห์การไหลในสภาวะคงตัว (Steady State) สองมิติและความเร็วของการไหลต่ำกว่าความเร็วเสียง ซอฟต์แวร์พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรจำ กัด (Finite Volume Method) โดยค่าของตัวแปรทั้งหมดถูกเก็บไว้ที่ตำแหน่งเดียวกัน (Collocated Grids) และใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงของ Rhie and Chow (Rhie and Chow Interpolation) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการไม่เกาะเกี่ยวกันระหว่างความเร็วกับความดัน แบบจำลองการปั่นป่วนประเภทสองสมการ (Two-Equation Turbulence Model) ถูกนำมาใช้ในกรณีที่การไหลเป็นแบบปั่นป่ว น ซอฟต์แวร์สามารถวิเคราะห์การไหลได้หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ การไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible Flow) การไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible Flow) การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซอฟต์แวร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ได้รับการทดสอบโดยการเปรียบเทียบผลการคำน วณกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขที่เป็นที่ยอมรับ

รวิทย์ และคณะ (2552) ศึกษาปัญหาการกัดเซาะตามแนวตลิ่ง และการทับถมของตะกอนพื้นที่บริเวณคลองมหาชัย และคลองหลวง จ .สมุทรสาคร จากอิทธิพลของระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่ างต่อเนื่อง โดยการจำลองเหตุการณ์บริหารประตูระบายน้ำกรณีต่างๆ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติด้วยโปรกรม CCHE2D จะสามารถใช้แสดงสภาพการไหลของน้ำที่อาจส่งผลให้เกิดการกัดเซาะ และสามารถติดตามการทับถมของตะกอนที่เปลี่ยนแปลงไปตามจังหวะการขึ้น-ลงของระดับน้ำทะเล

วิษุวัฒก์ (2552) ได้ศึกษาการจำลองการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลบริเวณพื้นที่ชายฝั่งท่าเรือเมืองดาร์วิน ประเทศออสเตรเลีย โดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE 21 HDFM ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย DHI Water Environment and Health ประเทศเดนมาร์ก เพื่อทำการจำลองแบบการไหลแบบ 2 มิติ โดยใช้วิธี Flexible Mesh ในการสร้างข้อมูลภูมิประเทศใต้ท้องทะเล การปรับเทียบแบบจำลองเลือกใช้ช่วงเวลาระหว่างวันที่ 24 ต.ค. 2537 ถึงวันที่ 23 พ.ย. 2537 โดยทำการเปรียบเทียบระดับน้ำทะเลรายชั่วโมงที่คำนวณได้กับค่าที่ตรวจวัดจริงบริเวณท่าเรือเมืองดาร์วิน ซึ่งพบว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีความคล่องตัวในการจำลองในพื้นที่ทะเลที่มีขนาดใหญ่ ได้เป็นอย่างดี

Bourgoin *et al*. (2007) ได้ศึกษาการพัดพาและการสะสมของตะกอนในแม่น้ำและบริเวณที่ราบน้ำท่วมของแม่น้ำอะเมซอน (Amazon) โดยการรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดในช่วงปี ค .ศ. 2000-2003 ซึ่งพบว่าส่วนใหญ่จะเกิดการตกตะกอนในช่วงน้ำท่วมที่กินระยะเวลา 5 เดือน คือตั้งแต่ธันวาคมไปจนถึงเมษายน และพบว่า ค่าเฉลี่ยการสะสมของตะกอนจะอยู่ที่ช่วง 558 และ 828×10^3 ตัน/ปี ตลอดระยะทาง 130 กม. การสะสมของตะกอนในแต่ละปีแสดงให้เห็นว่าการไหลของตะกอนดินจากแม่น้ำเข้าสู่ที่ราบน้ำท่วมในแต่ละปีนั้นอยู่ที่ค่าเฉลี่ยในช่วงประมาณ 41%-53% และมีค่าอัตราการตกตะกอนในแม่น้ำประมาณ 517 ตัน/กม./ปี หรือคิดเป็นอัตราการสะสมของตะกอนเท่ากับ 0.0016 ม./ปี ($\pm$ 23%)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Bui Minh *et al.* (2004) ได้ใช้แบบจำลอง depth-average โดยใช้วิธีการ finite-volume กับ boundary-fitted grids ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ ในแบบจำลองประกอบด้วย โมดูล unsteady hydrodynamic โมดูลการเคลื่อนที่ของตะกอน และโมดูลการเปลี่ยนรูปท้องน้ำ โดยในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาภายใต้เงื่อนการไหลแบบคงที่ และการไหลแบบไม่คงที่ ผลที่ได้จากแบบจำลองจะไปเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการ

Duc *et al.* (2004) ได้ใช้แบบจำลอง Depth-average โดยใช้วิธีการ Finite-volume กับ Boundary-fitted grids ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ ในแบบจำลองประกอบด้วย โมดูล unsteady hydrodynamic โมดูลการเคลื่อนที่ของตะกอน และโมดูลการเปลี่ยนรูปท้องน้ำ ผลที่ได้จากแบบจำลองเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่วัด ได้ในห้องปฏิบัติการ พบว่าตำแหน่งการกัดเซาะและการตกตะกอนของท้องน้ำมีความใกล้เคียงกัน

Gharibreza *et al.* (2014) ได้ศึกษากระบวนการตกตะกอนบริเวณพื้นที่ปากแม่น้ำ Zohreh ซึ่งไหลลงสู่อ่าวเปอร์เซีย โดยการประยุกต์ใช้ข้อมูลที่ตรวจวัดจากสนาม แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21 เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล (RS) และการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาจากแบบจำลอง MIKE21 พบว่า 80% ของตะกอนจะเคลื่อนที่ลงสู่อ่าวเปอร์เซีย และที่เหลืออีก 20% จะสะสมอยู่บริเวณปากแม่น้ำ ผลวิเคราะห์จาก RS พบว่าอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีและอัตราการตื้นเขินในระยะยาว เท่ากับ 0.07 ม. และ 2.45 ม. ตามลำดับ

Hardy *et al.* (2000) ได้ศึกษา และพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ 2มิติขึ้นมา เพื่อทำนายการสะสมปริมาณตะกอนในพื้นที่ทุ่งน้ำท่วม ที่เป็นผลมาจากการเกิดไหลล้นคันกันน้ำ โดยแบบจำลองจะเป็นการจำลองสภาพการไหล และการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยในลำน้ำ พื้นที่ราบน้ำท่วม และในสภาพภูมิประเทศที่มีความซับซ้อน ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองจะไปปรับเทียบกับอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยโดยใช้รังสี ซีเซียม-137 (137 caesium) ในการวิเคราะห์การตกตะกอนพื้นที่ทุ่งน้ำท่วม

Poulsen *et al.* (2013) ได้ศึกษาการกัดเซาะ และการตกตะกอนในแม่น้ำโอเดนเซ ประเทศเดนมาร์ก โดยสร้างแบบจำลองการไหลแบบ 2D และแบบจำลองพื้นที่ทุ่งน้ำท่วม (flood plain model) แล้วผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกสอบเทียบกับข้อมูลความเร็ว และความลึก ในวันและ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เวลาเดียวกันกับการตรวจวัดจากภาคสนาม เพื่อทำนายพื้นที่ และเวลาการเกิดน้ำท่วมในพื้นที่ทุ่งน้ำท่วม

Williams *et al.* (2006) ได้ศึกษาสภาพด้านอุทกพลศาสตร์ของพื้นที่ชายฝั่งทะเลเมืองดาร์วิน ประเทศออสเตรเลีย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจความเชื่อมโยงกันของสภาพด้านอุทกพลศาสตร์, การเคลื่อนตัวของตะกอนดิน และพลศาสตร์ของ Nutrient ในพื้นที่ศึกษาดังกล่าว ในอันที่จะช่วยในการบริหารจัดการการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานบริเวณท่าเรือดังกล่าว โดยแบบจำลองที่เลือกในศึกษาดังกล่าวคือ แบบจำลอง RMA-10 (1-D/2-D/3-D stratified flow) และ RMA-11 (1-D/2-D/3-D water quality) ผลที่ได้พบว่า แบบจำลองดังกล่าวประสบความสำเร็จในการจำลองการฟุ้งกระจายและการเคลื่อนตัวของตะกอนดินเนื่องการขุดลอกปากแม่น้ำ และยังสามารถใช้ศึกษาเรื่อง Resuspending sediment เนื่องจากการแพร่กระจายของความเค็มเมื่อถูกน้ำสะอาดจากระบบ แม่น้ำเคลื่อนทับบริเวณชั้นผิวน้ำตอนบนซึ่งอยู่เหนือชั้นของโคลนที่เกิดจากความเค็ม

Wu *et al.* (2004) ได้ใช้แบบจำลอง Depth-averaged 2มิติ เพื่อจำลองการไหลแบบไม่คงที่และการเคลื่อนที่ของตะกอนแบบไม่สม่ำเสมอในทางน้ำเปิด ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์โวลุ่ม (Finite volume method) กับ Nonstaggered และ Curvilinear grid เพื่อพิจารณาผลกระทบของแรงโน้มถ่วงของโลกเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของตะกอนและทิศทางการไหลของตะกอนท้องน้ำที่มีความลาดชัน โดยผลที่ได้จากแบบจำลองจะนำไปเปรียบกับผลของแบบจำลองกับกรณีอื่นๆ ร่วมถึงใช้ข้อมูลจากภาคสนาม เพื่อแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีผลสอดคล้องกับข้อมูลที่วัดได้

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำยังไม่มีการศึกษามากนักในประเทศไทย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาถึงสภาพทางอุทกพลศาสตร์ และการเคลื่อนที่ของตะกอนดิน เพื่อให้เข้าใจถึงสภาพลำน้ำในปัจจุบัน และเพื่อทราบแนวโน้มการตกตะกอนในอนาคต เพื่อที่จะหาแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องพิมพ์ 1 ชุด

2. โปรแกรมแบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21 ซึ่งเป็นลิขสิทธิ์ของ ห้องปฏิบัติการวิจัยการจำลองระบบทรัพยากรน้ำ ด้วยคอมพิวเตอร์ และระบบสารสนเทศ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

3. โปรแกรมจัดการเอกสาร MS-Word, MS-Excel และ MS-PowerPoint

4. โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

5. ข้อมูลระดับน้ำรายชั่วโมง/รายวัน ข้อมูลปริมาณการไหลรายชั่วโมง /รายวัน และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับปริมาณ การไหล (Rating curves) ของสถานีวัดน้ำท่า S.5 และ S.26 ที่ได้มีการบันทึกไว้โดยกรมชลประทาน และสถานีวัดน้ำท่า นครหลวง ที่ได้มีการบันทึกไว้โดยกรมเจ้าท่า โดยเลือ กใช้ข้อมูลนำเข้าย้อนหลัง 5 ปีหลังสุดตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน 2550 จนถึงวันที่ 31 มีนาคม 2556

6. ข้อมูลตะกอนท้องน้ำ ที่ทำการสำรวจในช่วงเดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ 2557

7. ข้อมูลรูปตัดขวางของลำน้ำ (River cross section) ที่ทำการสำรวจในช่วงเดือนธันวาคม 2556 ถึง มกราคม 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

การศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ โดยสรุปได้ทั้งสิ้น 6ขั้นตอน ดังนี้ (ดูภาพที่ 16 ประกอบ)

1. รวบรวมข้อมูลกายภาพของลุ่มน้ำ

2. จัดทำแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ในแม่น้ำด้วยแบบจำลอง MIKE21-HD พร้อมทั้งปรับเทียบ และตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

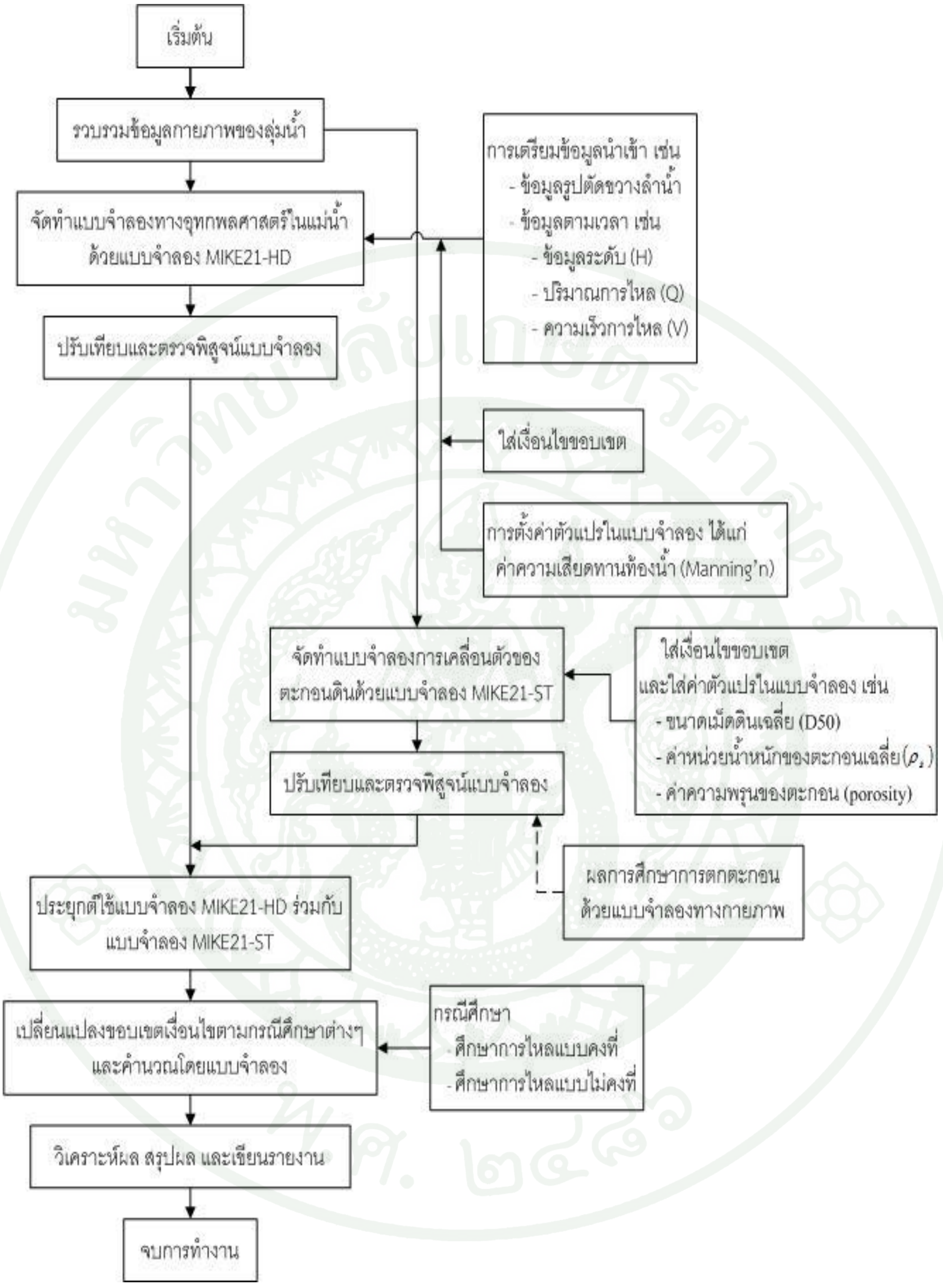
3. จัดทำแบบจำลองการเคลื่อน ที่ของตะกอนดินด้วยแบบจำลอง MIKE21-ST พร้อมทั้งปรับเทียบ และตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

4. ประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD ร่วมกับแบบจำลองMIKE21-ST

5. เปลี่ยนแปลงขอบเขตเงื่อนไขตามกรณีศึกษา และคำนวณ โดยแบบจำลองฯ

6. วิเคราะห์ผล สรุปผล และเขียนรายงาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 แสดงขั้นตอนการศึกษา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แต่ละขั้นตอนสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลกายภาพของลุ่มน้ำ ประกอบไปด้วย

1.1 ข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำ (River cross section) ทำการสำรวจในช่วงระหว่างเดือนธันวาคม 2556 จนถึงเดือนมกราคม 2557 โดยมีระยะห่างระหว่างรูปตัดประมาณ 50 ม. เป็นระยะทางรวมทั้งสิ้น 51.65 กม. จำนวน 1,033 รูปตัด โดยแต่ละจุดที่สำรวจมีค่าระดับอ้างอิงจากระดับน้ำทะเล หรือเรียกว่า ม .รทก. (m.MSL) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันในประเทศไทย ดังแสดงในภาพที่ 1

1.2 ข้อมูลระดับน้ำ และปริมาณการไหลรายชั่วโมง /รายวัน ของสถานี S.5 (กม.2+400) และ S.26 (กม.45+850) ที่ได้มีการบันทึกไว้โดยกรมชลประทาน และสถานีนครหลวง (กม. 16+650) ที่ได้มีการบันทึกไว้โดยกรมเจ้าท่า ซึ่งจะใช้ข้อมูลการตรวจวัดในช่วงเดือน ธันวาคม 2556 ถึงเดือน มกราคม 2557 ดังแสดงในภาพที่ 1

1.3 ข้อมูลตะกอนท้องน้ำ ที่ทำการตรวจวัดในแม่น้ำ ตั้งแต่ท้ายเขื่อนพระราม 6 โดยทำการตรวจวัด 4 จุดด้วยกัน ได้แก่ 1) วัดสะตือ ต .ท่าหลวง อ .ท่าเรือ จ .พระนครศรีอยุธยา (กม. 51+650) 2) วัดศาลาลอย ต.ศาลาลอย อ.ท่าเรือ จ.พระนครศรีอยุธยา (กม.38+400) 3) วัดแค ต.แค อ.ท่าเรือ จ.พระนครศรีอยุธยา (กม.30+400) และ 4) วัดธรรมนิยม ต.หัวรอ อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา (กม.2+100) ในช่วงเดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ 2557 ดังแสดงในภาพที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การจัดทำแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ในแม่น้ำด้วยแบบจำลอง MIKE21-HD

2.1 การสร้าง Bathymetry เป็นแบบ Flexible Mesh

โดยนำข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำที่ได้จากการสำรวจจริงเข้าสู่แบบจำลอง MIKE21-HD แล้วทำการสร้างโนด (Node) และอีลิเมนต์ (Element) ของ Bathymetry โดยขั้นตอนการใช้งานโดยละเอียด ดังแสดงในภาคผนวก ข

2.2 การกำหนดขอบเขตเงื่อนไข และการปรับเทียบแบบจำลอง MIKE21-HD

การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของแบบจำลองฯ สำหรับการปรับเทียบแบบจำลองฯ ได้พิจารณาเลือกข้อมูลที่สำรวจได้จริงในช่วงระหว่างวันที่ 1-31 ธันวาคม 2556 โดยขอบเขตด้านเหนือน้ำใช้เป็นข้อมูลปริมาณการไหลรายชั่วโมงที่สถานี S.26 ส่วนขอบเขตด้านท้ายน้ำใช้เป็นข้อมูลระดับน้ำรายชั่วโมงที่สถานี S.5 และปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (Sideflow) ประเมินได้จากสภาพตามธรรมชาติของน้ำที่ไหลเข้าสู่แม่น้ำป่าสักในช่วงระหว่างสถานี S.26 และ S.5

การปรับเทียบแบบจำลองฯ จะทำการสมมติค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระลำน้ำ (Manning’n Coefficient) ตลอดช่วงแม่น้ำป่าสัก จนกว่าจะทำให้ผลการคำนวณระดับน้ำจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จริงที่สถานีนครหลวง (NK) เข้าใกล้กันมากที่สุด ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ Manning’n จะแสดงถึงความเสียดทานต่อการไหลของน้ำในทางน้ำเปิด โดยค่า Manning’n ในทางน้ำเปิดของทางน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 - 0.05 และค่า Manning’n ในคลองส่งน้ำดาดคอนกรีตจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.013 - 0.015 ดังตารางที่ 11

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning’n

ชนิดและลักษณะทางน้ำ	ต่ำสุด	ปานกลาง	สูงสุด
1. ทางน้ำธรรมชาติ			
1.1 ลำน้ำย่อย (ความกว้างผิวน้ำที่เกิดอุทกภัย 100 ฟุต)			
1.1.1 ลำน้ำบนที่ราบ			
- สะอาด ตรง ระดับสูง ไม่มีแยกและบ่อลึก	0.025	0.030	0.033
- เหมือนข้อแรกแต่มีหินและวัชพืชมากกว่า	0.030	0.035	0.040
- สะอาด คดเคี้ยว มีบ่อและแก่งใต้น้ำ	0.033	0.040	0.045
- สะอาด คดเคี้ยว มีบ่อและแก่งใต้น้ำ แต่มีวัชพืชและหิน	0.035	0.045	0.050
- สะอาด คดเคี้ยว มีบ่อและแก่งใต้น้ำ มีวัชพืชและหิน แต่ระดับต่ำกว่าความลาดเทและรูปตัดไม่แน่นอน	0.040	0.048	0.055
- สะอาด คดเคี้ยว มีบ่อและแก่งใต้น้ำ มีวัชพืชและหิน แต่มีหินมากกว่า	0.045	0.050	0.060
- ช่วงที่ไหลช้า วัชพืช บ่อลึก	0.050	0.070	0.080
- ช่วงที่มีวัชพืชมาก บ่อลึกหรือทางอุทกภัยที่มีต้นไม้	0.075	0.100	0.150
1.1.2 ลำน้ำในหุบเขาไม่มีวัชพืชในทางน้ำ ตลิ่งลาดชัน ต้นไม้และพุ่มไม้ตามตลิ่งอยู่ใต้น้ำที่ระดับการไหลสูง			
- ก้น : กรวด ก้อนหิน และหินก้อนใหญ่ ๆเล็กน้อย	0.030	0.040	0.050
- ก้น : ก้อนหิน หินก้อนใหญ่กว่าข้อแรก	0.040	0.050	0.070
1.2 ทาม			
1.2.1 ทุ่งหญ้า ไม่มีพุ่มไม้			
- หญ้าสั้น	0.025	0.030	0.035
- หญ้ายาว	0.030	0.035	0.050
1.2.2 พื้นที่เพาะปลูก			
- ไม่มีพืช	0.020	0.030	0.040
- พืชเป็นแถวที่แก่	0.025	0.035	0.045
- พืชไร่ที่แก่	0.030	0.040	0.050
1.2.3 ไม้พุ่ม			
- ไม้พุ่มกระจัดกระจาย วัชพืชขึ้นหนา	0.035	0.050	0.070

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ชนิดและลักษณะทางน้ำ	ต่ำสุด	ปานกลาง	สูงสุด
1.2.4 ต้นไม้			
- พื้นที่ว่างเปล่ามีตอไม้ไม่มีหน่อ			
- เหมือนข้อ 2.2.4.1 แต่มีหน่อมาก	0.030	0.040	0.050
- มีไม้ยืนต้นมาก มีไม้ล้มเล็กน้อย ต้นเล็กมีเล็กน้อยระดับน้ำต่ำ	0.050	0.060	0.080
กว่ากิ่งก้าน	0.080	0.100	0.120
- เหมือนข้อ 2.2.4.3 แต่ระดับน้ำถึงกิ่งก้าน			
1.3 ลำน้ำหลัก (ผิวน้ำเมื่อเกิดอุทกภัยกว้าง 100 ฟุต) ค่าน้อยกว่าลำ	0.100	0.120	0.160
น้ำย่อยที่มีลักษณะเหมือนกัน			
1.3.1 รูปตัดสม่ำเสมอ ไม่มีก้อนหินหรือไม้พุ่ม			
1.3.2 ไม่สม่ำเสมอ และรูปตัดขรุขระ	0.025		0.060
	0.035		0.100

ที่มา: Fundamentals of Fluid Mechanics (1990)

ในการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ จะใช้ดัชนีทางสถิติมาเป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบและตัดสินใจ ประกอบด้วย

ค่าความแม่นยำจะใช้วิธี Root mean square error (RMSE) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (66)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x-y)^2}{n}} \qquad (66)$$

ค่าความสอดคล้องกันจะใช้วิธีทาง Goodness-of-fit โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพัทธ์ยกกำลังสอง (Coefficient of determination, R^2) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (67)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})\times(y_i-\bar{y})}{\sum_{i-1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\times\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}\right)^2 \qquad (67)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ x = ระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัด

y = ระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง

$\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัด

$\bar{y}$ = ค่าเฉลี่ยระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง

i = ลำดับของข้อมูล

n = จำนวนข้อมูล

ค่าที่ยอมรับได้ของค่า Coefficient of determination (R^2) ค่า r มีค่าอยู่ระหว่าง - 1 ถึง 1 ถ้า r มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีสหสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างสมบูรณ์และรายละเอียดเกี่ยวกับเกณฑ์ระดับต่างๆ ดังตารางที่ 12 (วราวุธ, 2553) ส่วนค่า Root mean square error (RMSE) ต้องมีค่าน้อยที่สุด (เข้าใกล้ 0) แสดงว่าชุดข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลตรวจวัดน้อย

ตารางที่ 12 การแปลความหมายค่า NSE และ R^2

เกณฑ์	ความหมาย
1	แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยไม่มีความผิดพลาด (Perfect Fit)
> 0 ถึง < 1	แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยมีความแม่นยำมากกว่าการใช้ค่าเฉลี่ย (Arthmetic Mean)
0	แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยมีความแม่นยำไม่ต่างจากการคาดคะเนโดยใช้ค่าเฉลี่ย
< 0	แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยมีความแม่นยำน้อยกว่าการคาดคะเนโดยใช้ค่าเฉลี่ย
≥ 0.75	Good prediction (Lian *et al.*,2007)
0.36 - 0.75	Satisfactory prediction (Lian *et al.*,2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การจัดทำแบบจำลองการเคลื่อนตัวของตะกอนทรายด้วยแบบจำลอง MIKE21-ST

3.1 การกำหนดตัวแปรแบบจำลองฯ

รวบรวมข้อมูลตัวอย่างตะกอนดินทั้ง 4 จุด เพื่อนำมาวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนเฉลี่ย (d_{50}) ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ย (ρ_s) และค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ย (Porosity) จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นสามารถคำนวณหาความเร็วของการตกตะกอน (w_s) ได้จากสมการ (57) และกำหนดค่าตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลอง

3.2 การปรับเทียบแบบจำลอง MIKE21-ST

แบบจำลอง MIKE21-ST นั้นต้องใช้การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายความเร็วของกระแสน้ำในแบบจำลอง MIKE21-HD มาเป็นตัวพาตะกอนให้เคลื่อนที่ ดังนั้นจึงกำหนดให้การปรับเทียบแบบจำลองนี้ต้องวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างแบบจำลอง HD/ST โดยกำหนดให้เป็นอัตราการไหลคงที่ (Steady flow) โดยพิจารณาเลือกใช้การไหลที่เปอร์เซ็นไทน์ (Percentile) ที่ 25% 50% 75% และ 95% ซึ่งวิเคราะห์ได้จากปริมาณการไหลสูงสุดรายปีที่สถานี S.5 เพื่อเป็นตัวแทนการไหลทั้งในช่วงน้ำน้อยจนถึงน้ำมาก เท่ากับความจุลำน้ำของแม่น้ำป่าสัก

3.3 การตรวจสอบผลการปรับเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์ และผลจากแบบจำลองกายภาพ

เนื่องการข้อมูลการตรวจวัดตะกอนรายวันตั้งแต่บริเวณด้านท้ายน้ำของเขื่อนพระรามหกลงมา ไม่มีการเก็บบันทึก ดังนั้นการปรับเทียบแบบจำลอง จึงใช้การเปรียบเทียบ ผลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากแบบจำลองกายภาพ (ศูนย์วิจัยวิศวกรรมและและการจัดการน้ำ, 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-ST เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นท้องน้ำ

ในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง หลังจากการปรับเทียบแบบจำลอง MIKE21-HD และกำหนดตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลอง MIKE21-ST ซึ่งในการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 กรณี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การศึกษาการไหลแบบคงที่ตามเวลา (Steady flow)

โดยพิจารณาเลือกใช้การไหลที่เปอร์เซ็นไทน์ (Percentile) ที่ 25%, 50%, 75% และ 95% ซึ่งวิเคราะห์ได้จากปริมาณการไหลสูงสุดรายปีที่สถานีวัดน้ำท่า S.5 และนำมาจัดทำเป็นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอนรายปี และนำไปวิเคราะห์หาอัตราการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 6 ปีหลังสุดระหว่างปี พ.ศ. 2550-2555 โดยใช้ข้อมูลปริมาณการไหลรายวันที่สถานี S.5 ซึ่งมีปริมาณการไหลที่ผันแปรตลอดปีมาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอนที่พัฒนาขึ้น

4.2 การศึกษาการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลา (Unsteady flow)

กำหนดให้ขอบเขตด้านเหนือน้ำของแบบจำลอง MIKE21-HD เป็นอัตราการไหลรายวันที่สถานี S.26 และขอบเขตด้านท้ายน้ำเป็นระดับน้ำรายวันที่สถานี S.5 ในช่วงปี พ.ศ.2550-2555 ส่วนตัวแปรในแบบจำลอง MIKE21-ST ใช้เหมือนกับข้อ 4.1 และวิเคราะห์หาอัตราการตกตะกอนรายปีเช่นเดียวกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

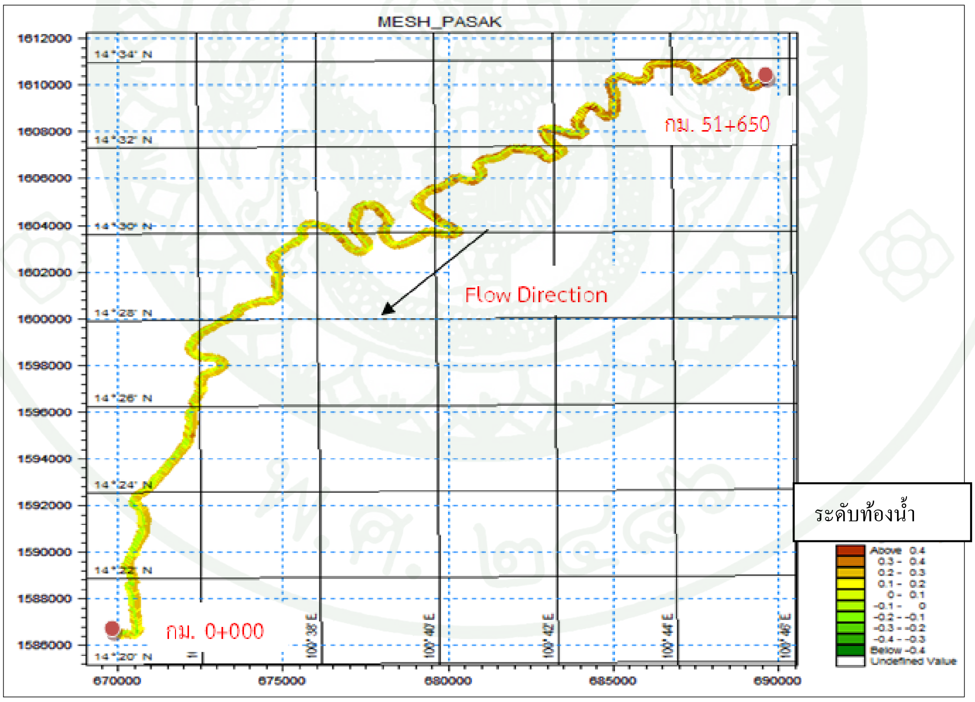
ผลและวิจารณ์

ผล

ผลการศึกษาครั้งนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1) ผลการจัดทำแบบจำลอง MIKE21-HD 2) ผลการวิเคราะห์ตะกอนในแม่น้ำ และ 3) ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-ST โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการจัดทำแบบจำลอง MIKE21-HD

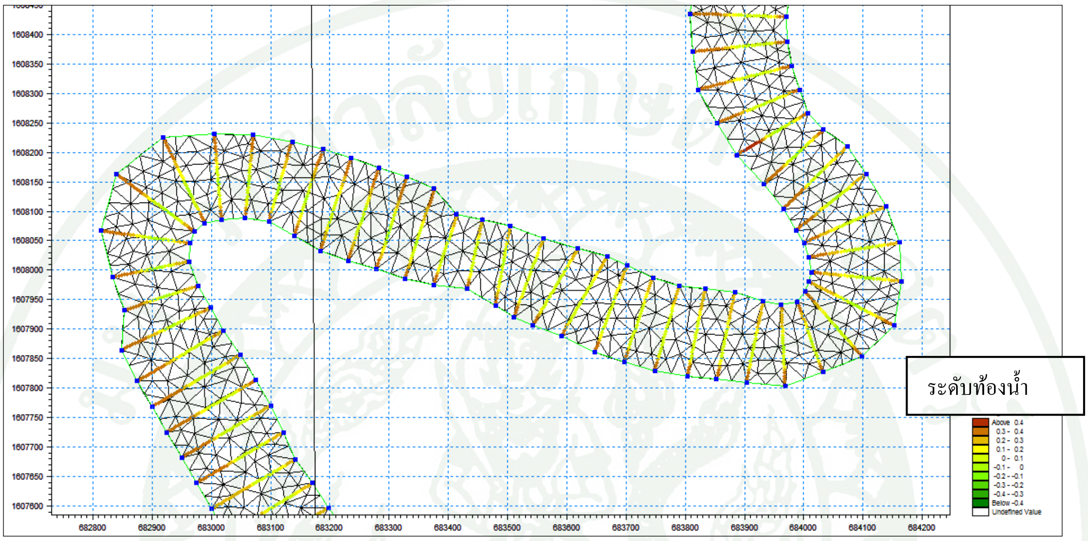
ผลการสร้างแผนที่แสดงสภาพภูมิประเทศของพื้นท้องลำน้ำ (Bathymetry) แบบ Flexible Mesh ด้วยแบบจำลอง MIKE21-HD ดังแสดงในภาพที่ 17



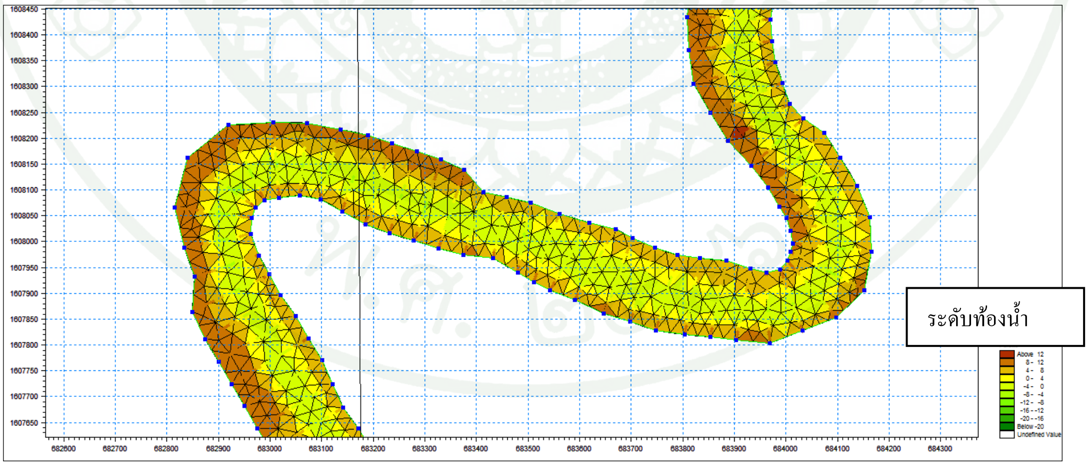
ภาพที่ 17 แผนที่แสดงสภาพภูมิประเทศของพื้นท้องลำน้ำ (Bathymetry) ของแม่น้ำป่าสัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการสร้างโนด (Node) และอีลิเมนต์ (Element) ของ Bathymetry ของบริเวณแม่น้ำป่าสัก โดยสรุปมีจำนวนโนดทั้งสิ้น 11,584 โนด ดังแสดงใน ภาพที่ 18 และมีจำนวนอีลิเมนต์ทั้งสิ้น 19,252 อีลิเมนต์ ดังแสดงใน ภาพที่ 19 โดยกำหนดขนาดเล็กสุดของ Element มีค่าไม่เกิน 600 ตร.ม.ซึ่งจะทำให้การคำนวณมีเสถียรภาพ

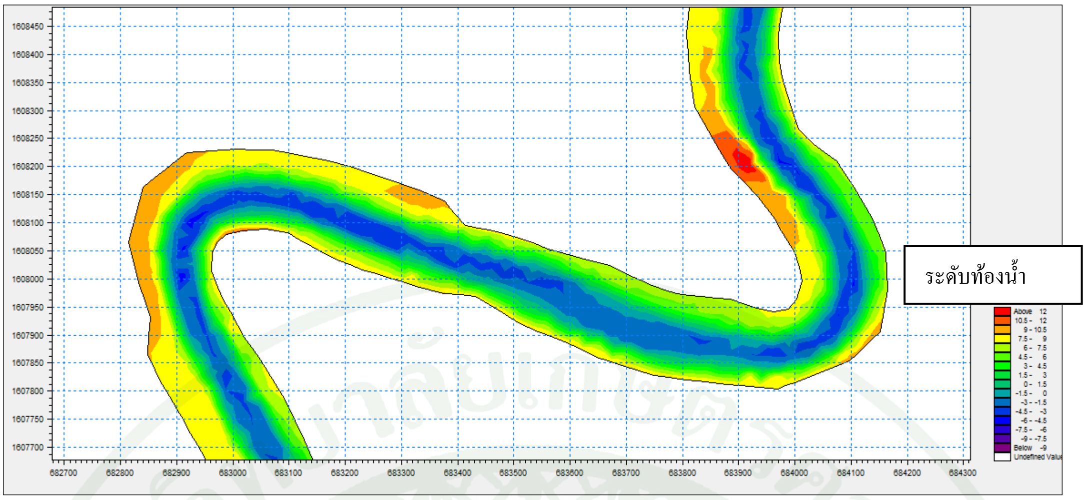


ภาพที่ 18 ตัวอย่างโนด (Node) ของ Bathymetry ของแม่น้ำป่าสัก



ภาพที่ 19 ตัวอย่างอีลิเมนต์ (Element) ของ Bathymetry ของแม่น้ำป่าสัก

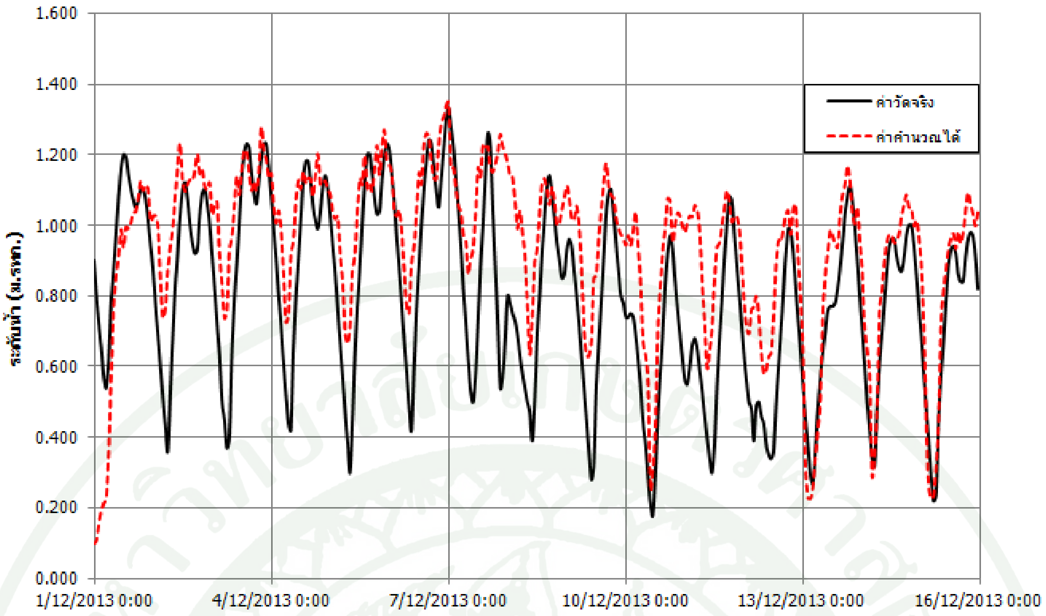
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



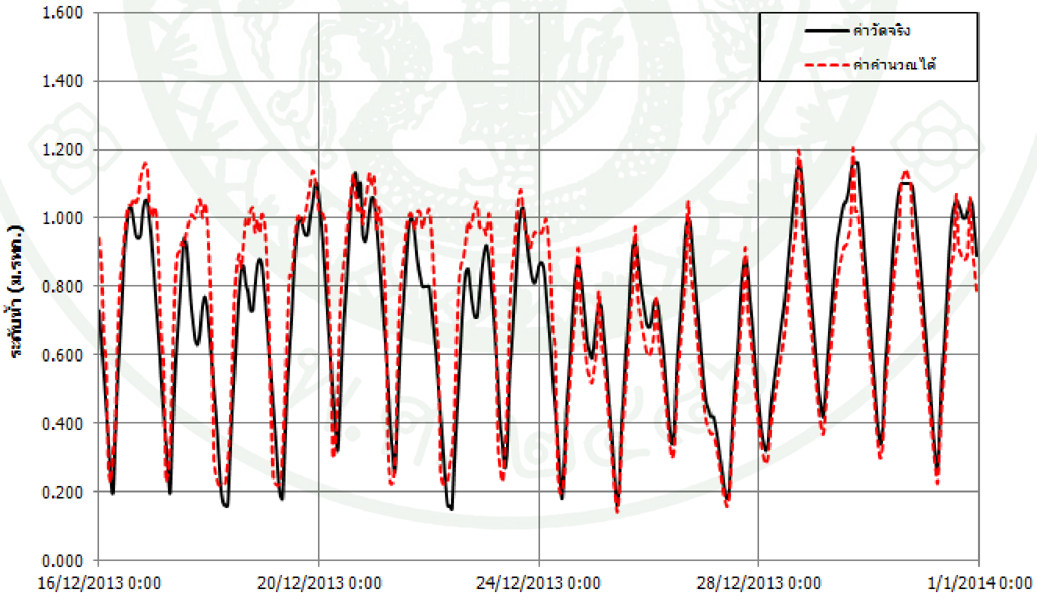
ภาพที่ 20 ภาพสองมิติ Bathymetry ของแม่น้ำป่าสัก

ผลการปรับเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง พบว่า ค่า Manning’M เท่ากับ 35 หรือมีค่า Manning’n ซึ่งเป็นส่วนกลับเท่ากับ 0.0286 จะทำให้ค่าผลการคำนวณฯ ที่สถานีนครหลวง (NK) ใกล้เคียงกับที่ตรวจวัดได้จริงมากที่สุด ในการปรับเทียบแบบจำลองได้พิจารณาเลือกใช้วันที่ 1- 15 ธ.ค. 2556 ส่วนการตรวจพิสูจน์แบบจำลองเลือกพิจารณาในวันที่ 16 – 31 ธ.ค. 2556 โดยแสดงผลการปรับเทียบ และการตรวจพิสูจน์ ระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองฯ กับค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดได้จริงบริเวณสถานีวัดระดับน้ำอำเภอ นครหลวงของกรมเจ้าท่า แสดงดังภาพที่ 21 ก และ21 ข ตามลำดับ โดยการปรับเทียบแบบจำลอง มีค่าดัชนีทางสถิติ คือ ค่า r^2 มีค่าเท่ากับ 0.75 และค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.23 ม. ส่วนการตรวจสอบแบบจำลอง มีค่าดัชนีทางสถิติ คือ ค่า r^2 มีค่าเท่ากับ 0.90 และค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.12 ม. ซึ่งผ่านเกณฑ์การปรับเทียบฯ และสามารถนำแบบจำลอง MIKE21-HD นี้ไปประยุกต์ใช้ในศึกษาขั้นต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) ผลการปรับเทียบค่าระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง MIKE21-HD กับค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดได้จริงของสถานีนครหลวง



(ข) ผลการตรวจพิสูจน์ค่าระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง MIKE21-HD กับค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดได้จริงของสถานีนครหลวง

ภาพที่ 21 ผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE21-HD

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ผลการวิเคราะห์ตะกอนในแม่น้ำ

2.1 ผลการจัดทำแบบจำลอง MIKE21-ST

ผลการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนเฉลี่ยด้านท้ายเขื่อนพระราม 6 พบว่า มีค่าเฉลี่ย d_{50} ประมาณ 0.12 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของตะกอนในแม่น้ำป่าสักบริเวณด้านเหนือเขื่อนพระราม 6 มีค่าเฉลี่ย d_{50} ประมาณ 1.25 มม. ค่าหน่วยน้ำหนักขอ งตะกอนดินเฉลี่ย (ρ_s) เท่ากับ 2,650 กม./ลบ.ม. ค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.4 (ศูนย์วิจัยวิศวกรรมและและการจัดการน้ำ, 2557) จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจึงเลือกใช้สมการ (57) มาคำนวณหาความเร็วของการตกตะกอน (W_s) เพราะว่าขนาดข องตะกอนเฉลี่ย (d_{50}) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.1-1 มม. ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

จากสมการ

$$W_s = \frac{\nu}{d_{50}}\left(\sqrt{100 + \frac{(s-1)gd_{50}^3}{\nu^2}} - 10\right)$$

โดยที่ d_{50} = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน = 0.12 mm

s = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตะกอน = 2,650 kg/m^3

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 m/s^2

ν = ความหนืดของน้ำ = 1×10^{-6} m^2/s

แทนค่าในสมการ จะได้

$$W_s = \frac{1\times10^{-6}}{1.20\times10^{-4}}\left(\sqrt{100 + \frac{\left(\left(\frac{2,650}{1,000}\right)-1\right)\times 9.81\times\left(1.20\times10^{-4}\right)^3}{\left(1\times10^{-6}\right)^2}} - 10\right)$$

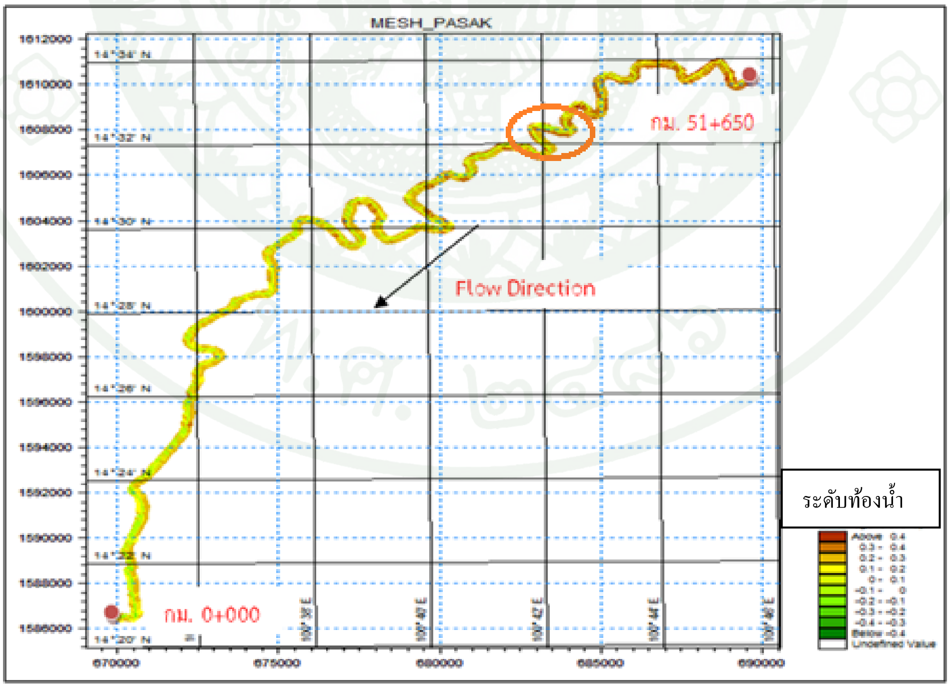
$= 0.0109$ เมตร/วินาที

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

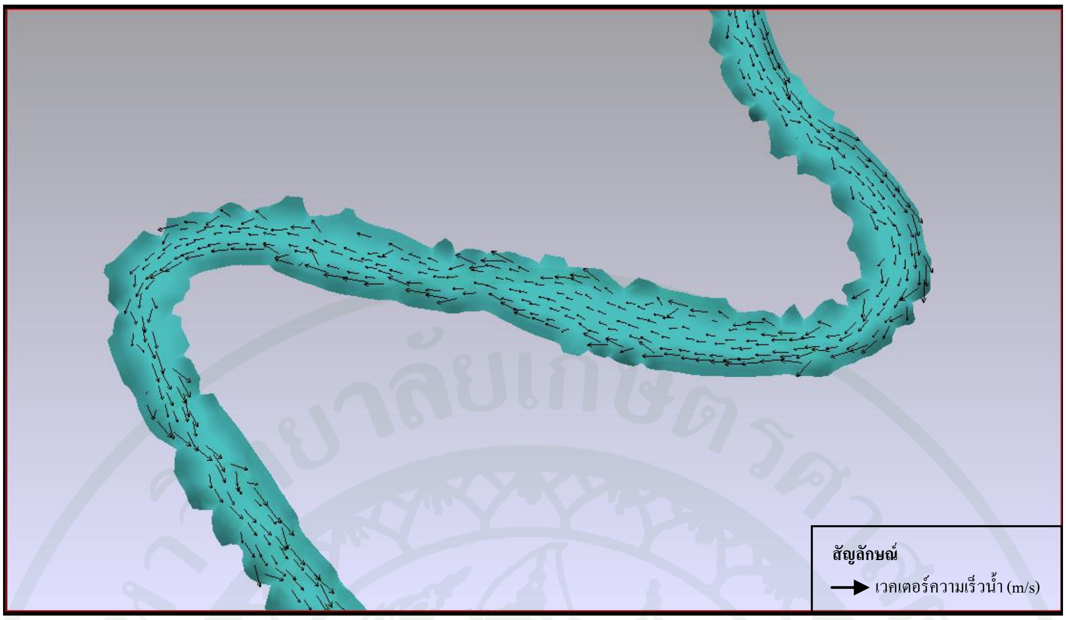
ค่าความเร็วของการตกตะกอน (W_s) นี้ จะนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นท้องน้ำโดยใช้แบบจำลอง MIKE21 ต่อไป

2.2 ผลการศึกษากระแสน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21-HD กรณี Steady flow

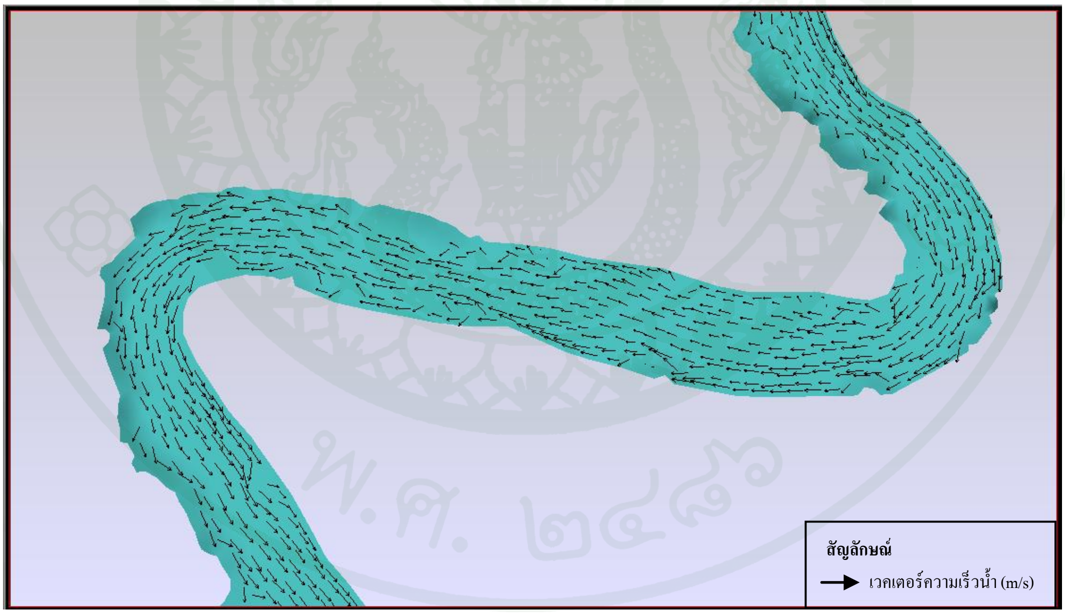
การศึกษากระแสน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21-HD ผลการจำลองสภาพลำน้ำป่าสักในสภาพปัจจุบันที่เปอร์เซ็นไทน์ (Percentile) ที่ 25% 50% 75% และ 95% ซึ่งมีปริมาณการไหลสูงสุดเท่ากับ 100 240 500 และ 750 ลบ.ม./วินาที ตามลำดับ ทำให้ทราบถึงขนาดและทิศทางของกระแสน้ำในแม่น้ำป่าสัก แสดงดังภาพที่ 23 จากภาพจะเห็นได้ว่ากร ะแสน้ำป่าสักมีรูปแบบของเวคเตอร์ความเร็วของกระแสน้ำค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงลำน้ำ ซึ่งตัวอย่างที่นำมาเป็นตัวอย่างนี้เป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่ศึกษา ที่ กม .38+500 ถึง กม. 40+500 ดังแสดงในภาพที่ 22 สำหรับผลการวิเคราะห์ความเร็วของกระแสน้ำที่เปอร์เซ็นไทน์ (Percentile) ที่ 25% 50% 75% และ 95% ของแม่น้ำป่าสักในสภาพปัจจุบัน แสดงใน ตารางที่ 13 พบว่าความเร็วของกระแสน้ำแปรผันตามตามปริมาณการไหล อธิบายคือ ปริมาณการไหลน้อยความเร็วของกระแสน้ำก็น้อย แต่ถ้าปริมาณการไหลมากความเร็วของกระแสน้ำก็มาก



ภาพที่ 22 ช่วงลำน้ำที่นำมาแสดงตัวอย่างเวคเตอร์ความเร็วน้ำ และอัตราการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ ที่ กม.38+500 ถึง กม. 40+500



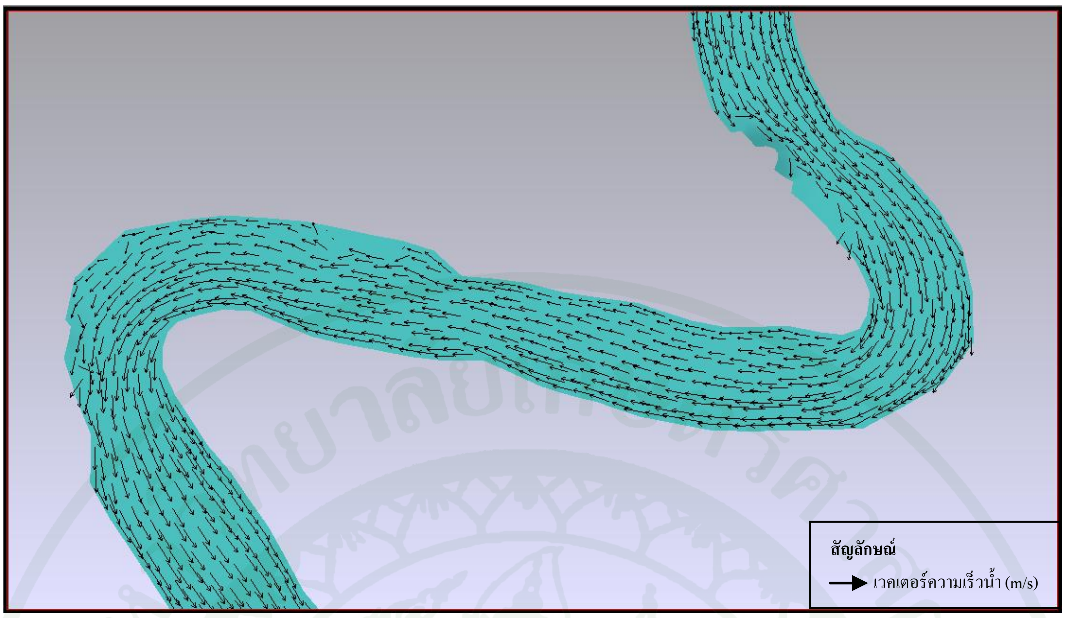
ก) ตัวอย่างผลการจำลองสภาพลำน้ำที่อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 100 ลบ.ม./วินาที



ข) ตัวอย่างผลการจำลองสภาพลำน้ำที่อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 240 ลบ.ม./วินาที

ภาพที่ 23 ตัวอย่างผลการจำลองจากแบบจำลอง MIKE21-HD ช่วง กม.38+500 – กม. 40+500

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ค) ตัวอย่างผลการจำลองสภาพลำน้ำที่อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 500 ลบ.ม./วินาที

ง) ตัวอย่างผลการจำลองสภาพลำน้ำที่อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 750 ลบ.ม./วินาที

ภาพที่ 23 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ความเร็วของกระแสน้ำ ที่เปอร์เซ็นไทน์ต่างๆ ของสถานี S.5

ปริมาณการไหลที่เปอร์เซ็นไทน์ (%)	ความเร็วของกระแสน้ำ (m/s)
25% (100 $m^3 s^{-1}$)	0.76
50% (240 $m^3 s^{-1}$)	1.13
75% (500 $m^3 s^{-1}$)	1.41
95% (750 $m^3 s^{-1}$)	1.50

2.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นท้องน้ำ

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นท้องน้ำด้วยแบบจำลอง MIKE21-HD/ST โดยกำหนดค่าตัวแปรที่สำคัญ (Parameter) ในแบบจำลองดังกล่าวได้ดังนี้

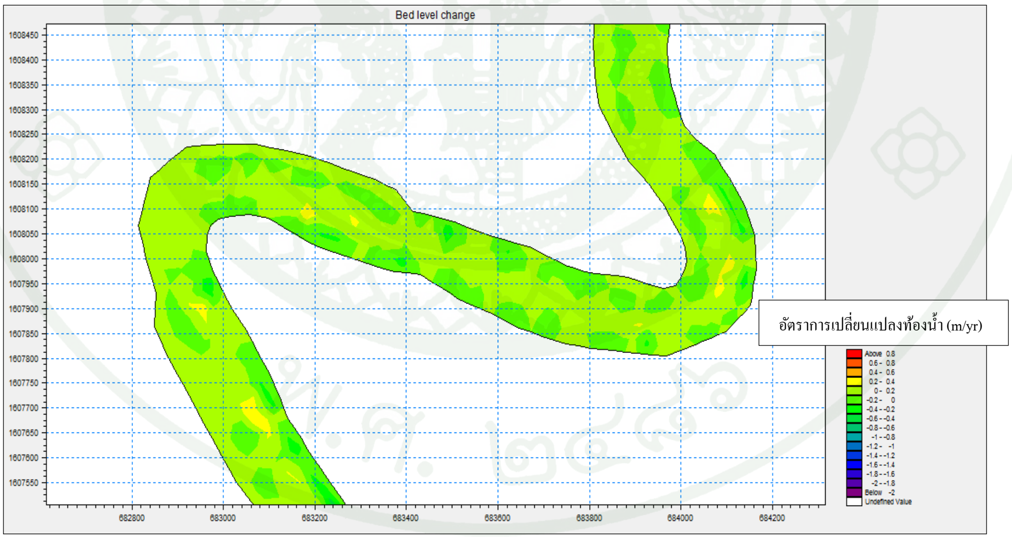
ตารางที่ 14 ตัวแปรที่สำคัญ (Parameter) ในแบบจำลอง MIKE21-HD/ST

Parameter	Value
Fluid density, ρ_w	1000 kg/m^3
Longitudinal dispersion coefficient, D_x	10 m^2/s
Transversal dispersion coefficient, D_y	10 m^2/s
Erosion coefficient, E	0.4 $kg/m^2/s$
Critical shear stress for erosion, τ_e	0.1 N/m^2
Settling velocity, W_s	0.0109 m/s^1 (ได้จากการสำรวจ)
Critical shear stress for deposition, τ_d	0.1 N/m^2
Boundary suspended-sediment concentration, c_o	0.0 kg/m^3
Bulk density of bottom sediment, ρ_s	2650 kg/m^3 (ได้จากการสำรวจ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จาก ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำจากแบบจำลองฯ พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำในแม่น้ำป่าสักมี 2 ลักษณะ คือ พื้นที่ทับถม (Deposition area) และพื้นที่กัดเซาะ (Erosion area) ซึ่งสามารถสรุปเป็นอัตราการตกตะกอน (ค่าเป็นบวก) และอัตราการกัดเซาะ (ค่าเป็นลบ) ของแต่ละ ปริมาณการ ไหล ได้แก่ 100 240 500 และ 750 ลบ.ม./วินาที ตามลำดับ โดยสามารถสรุปได้ดัง ตารางที่ 14 และตัวอย่างผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง MIKE21 ที่ปริมาณการ ไหล 100 240 500 และ 750 ลบ.ม./วินาที ในภาพที่ 24 ส่วนผลจากแบบจำลองกายภาพที่ทำการทดลองที่ ปริมาณการไหล 100 และ 500 ลบ.ม./วินาที (ศูนย์วิจัยวิศวกรรมและและการจัดการน้ำ, 2557) สามารถสรุปเป็นอัตราการตกตะกอนได้ดังตารางที่ 14

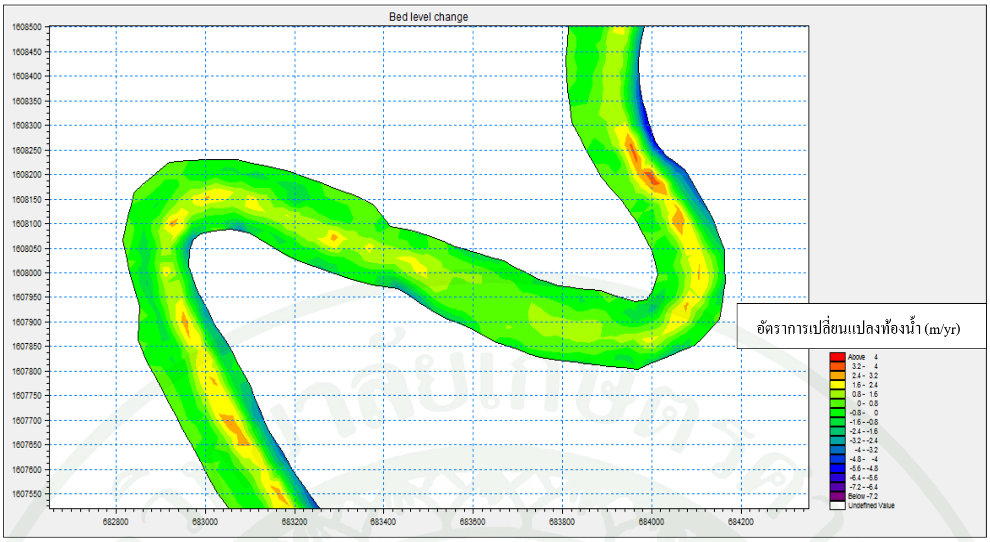
จากผลการศึกษาเมื่อพิจารณาแม่น้ำป่าสัก ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ มีอัตราการตกตะกอนอยู่ในช่วง ระหว่าง 0.66 ถึง 0.95 เมตร/ปี ส่วนอัตราการตกตะกอนที่ได้จากแบบจำลองกายภาพอยู่ในช่วงระหว่าง 0.70 ถึง 0.79 เมตร/ปี โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการไหล ที่ 100 และ 500 ลบ.ม./วินาที ระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์ กับแบบจำลองกายภาพ พบว่า อัตราการตกตะกอนแตกต่างกันไม่มากนัก (ร้อยละ 6 และ 4 ตามลำดับ)



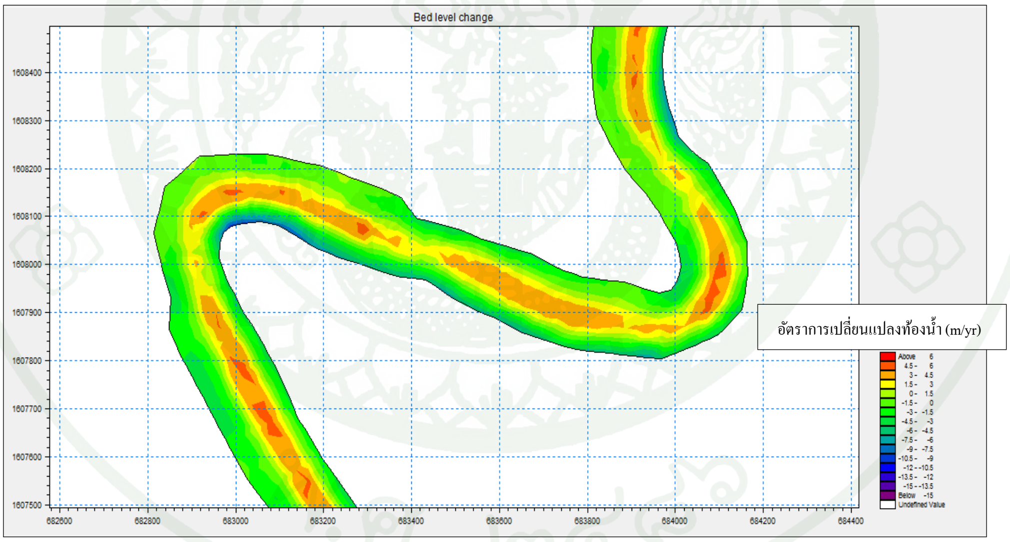
ก) ตัวอย่างผลการจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำที่อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 100 ลบ.ม./วินาที

ภาพที่ 24 ตัวอย่างผลการจำลองจากแบบจำลอง MIKE21-HD/ST ช่วง กม.38+500 – กม. 40+500

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



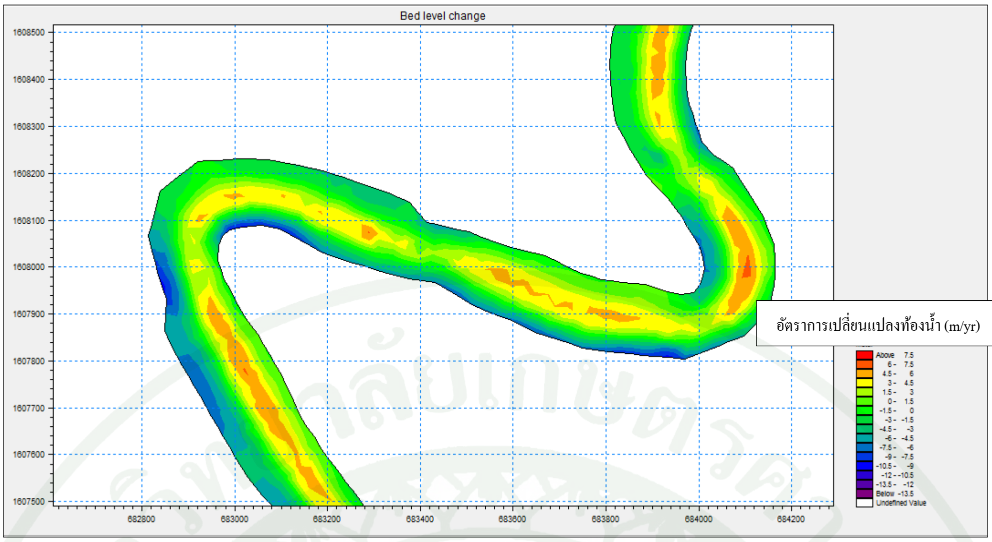
ข) ตัวอย่างผลการจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำที่อัตราการไหลคงที่ เท่ากับ 240 ลบ.ม./วินาที



ค) ตัวอย่างผลการจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำที่อัตราการไหลคงที่ เท่ากับ 500 ลบ.ม./วินาที

ภาพที่ 24 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ง) ตัวอย่างผลการจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำที่อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 750 ลบ.ม./วินาที

ภาพที่ 24 (ต่อ)

ตารางที่ 15 อัตราการตกตะกอนในแม่น้ำป่าสักแต่ละอัตราการไหลที่วิเคราะห์ได้จาก แบบจำลอง MIKE21 และแบบจำลองกายภาพ

ผลการศึกษา	**อัตราการตกตะกอน (m/yr)**			
	100 (m^3/s)	**240 (m^3/s)**	**500 (m^3/s)**	**750 (m^3/s)**
แบบจำลองคณิตศาสตร์	0.66	0.73	0.82	0.95
แบบจำลองกายภาพ	0.70	-	0.79	-

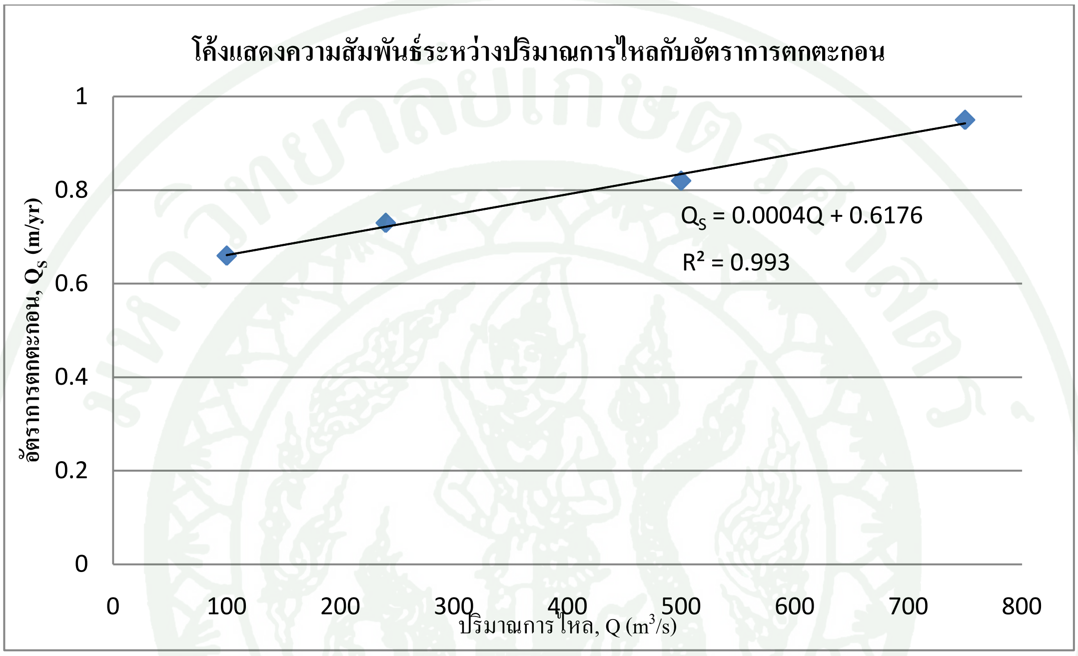
นอกจากนี้จากอัตราการตกตะกอนในแต่ละอัตราการไหลทั้ง 4 ค่าที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสองมิติ จึงได้ทำการสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสอง แสดงดังภาพที่ 25 เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 6 ปีหลังสุดระหว่างปี พ.ศ. 2550 - 2555 มีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$Q_S = 0.0004Q+0.6176 \qquad R^2 = 0.993 \qquad (68)$$

เมื่อ Q_S = อัตราการตกตะกอน (m/yr)

Q = ปริมาการไหล (m^3/s)



ภาพที่ 25 โค้งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอนในแม่น้ำป่าสักที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ แบบ Steady flow

3. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-ST

ผลการศึกษาส่วนนี้เป็นผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นท้องน้ำ เพื่อนำไปหาอัตราการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 6 ปีหลังสุดระหว่างปี พ.ศ. 2550-2555 ของแม่น้ำป่าสัก โดยใช้ข้อมูลปริมาณการไหลรายวันที่ สถานี S.5 ซึ่งมีปริมาณการไหลที่ผันแปรตลอดปีมาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอนที่พัฒนาขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ 1) Steady flow และ 2) Unsteady flow ผลแสดงดังตารางที่ 15 ซึ่งพบว่า กรณี Steady flow อัตราการตกตะกอนจะผันแปรในแต่ละปีอยู่ในช่วง 0.69 ถึง 1.01 ม./ปี และมีค่าอัตราการ ตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.76 ม./ปี ส่วนกรณี Unsteady

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

flow อัตราการตกตะกอนรายปีจะลดลงอยู่ในช่วง 0.18 ถึง 0.33 ม./ปี และมีค่าอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.22 ม./ปี

ตารางที่ 16 อัตราการตกตะกอนรายปีในแม่น้ำป่าสักที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง MIKE21 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550-2555

กรณีศึกษา	**อัตราการตกตะกอน (m/yr)**						
	พ.ศ.2550	**พ.ศ.2551**	**พ.ศ.2552**	**พ.ศ.2553**	**พ.ศ.2554**	**พ.ศ.2555**	**ค่าเฉลี่ย**
การไหลแบบคงที่	0.71	0.73	0.66	0.77	1.01	0.69	0.76
การไหลแบบไม่คงที่	0.19	0.21	0.17	0.23	0.33	0.18	0.22

ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-ST พบว่า การไหลแบบ Steady ให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบ Unsteady โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 29 ดังนั้น การหาอัตราการตกตะกอนรายปี โดยใช้ข้อมูลการไหลแบบ Steady มาวิเคราะห์ร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอนที่พัฒนาขึ้น ต้องทำการปรับแก้ค่าอัตราการตกตะกอนที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ทำได้โดยคูณด้วยผลต่างของค่าเฉลี่ยของอัตราการตกตะกอนจากกรณีการไหลแบบ Steady และการ ไหลแบบ Unsteady (ร้อยละ 29) แสดงดังตารางที่ 16 จากนั้นนำค่าอัตราการตกตะกอนที่ทำการปรับแก้แล้วมาจัดทำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอน แสดงดังภาพที่ 26 มีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_S = 0.0001Q+0.1791 \qquad R^2 = 0.993 \qquad (69)$$

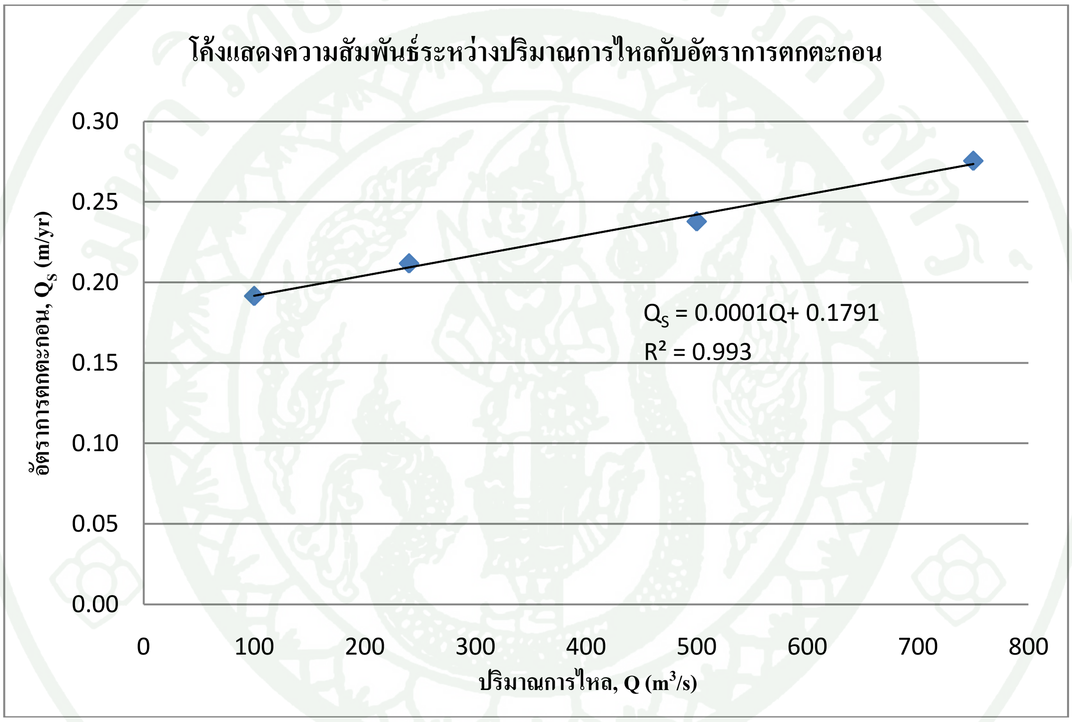
เมื่อ Q_S = อัตราการตกตะกอน (m/yr)

Q = ปริมาการไหล (m^3/s)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 17 ผลการปรับแก้อัตราการตกตะกอนในแม่น้ำป่าสักแต่ละอัตราการไหลที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์

ผลการศึกษา	อัตราการตกตะกอน (m/yr)			
	100 (m^3/s)	240 (m^3/s)	500 (m^3/s)	750 (m^3/s)
แบบจำลองคณิตศาสตร์	0.19	0.21	0.24	0.28



ภาพที่ 26 โค้งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอนที่ปรับแก้ด้วยการวิเคราะห์ Unsteady flow

โค้งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอน ที่ปรับแก้แล้ว เมื่อนำไปหาอัตราการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 6 ปีหลังสุดระหว่างปี พ .ศ. 2550-2555 ของแม่น้ำป่าสัก จะทำให้ได้ค่าอัตราการรายปีของกรณีการไหลแบบ Steady และ Unsteady มีค่าใกล้เคียงกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิจารณ์

1. ผลการปรับเทียบแบบจำลอง MIKE21-HD มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างแต่ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี จากการใช้ค่าทางสถิติมาช่วยในการตัดสินใจของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนมีสาเหตุมาจาก ข้อจำกัดด้านข้อมูล คือ ข้อมูล ระดับน้ำ และข้อมูล ปริมาณการไหลที่นำมาใช้นั้นเป็นข้อมูลรายวัน และในบางสถานีมีข้อมูลไม่คร บถ้วน และตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าในลุ่มน้ำมีค่อนข้างน้อย

2. การศึกษากระแสน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21-HD เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ ความเร็วกระแสน้ำ และการไหลที่ตอบสนองต่อการควบคุมพฤติกรรมการไหลในรูปแบบต่างๆ โดยทั่วไปในการก่อสร้างอาคารกีดขวางในลำน้ำ ยกตัวอย่างเช่น สะพาน จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบที่มีต่อทิศทางและความเร็วของกระแสน้ำโดยในทางทฤษฎีพบว่า การไหลปั่นป่วนรอบวัตถุที่กีดขวางการไหลจะมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะความปั่นป่วนด้านท้ายตอม่ออันเนื่องมาจากอิทธิพลของความหนืดของไหล และรูปทรงของวัตถุ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้พิจารณาถึงปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น แต่ผลที่ได้จากศึกษากระแสน้ำ ดังภาพที่ 23 พบว่าบริเวณขอบตลิ่งมีความปั่นป่วนของกระแสน้ำ เนื่องจากขอบตลิ่งไม่ ราบเรียบ (Smooth) เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของแบบจำลอง ทำให้กระแ สน้ำที่ไปชนกับขอบตลิ่งมีความปั่นป่วน ทำให้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของตะกอน เพราะว่าการเคลื่อนที่ของตะกอนนั้น ต้องอาศัยกระแสน้ำในการเคลื่อนที่ จากภาพที่ 24 จะเห็นได้ว่า โค้งที่สอง เกิดการกัดเซาะที่โค้งใน และเกิดการทับถมของตะกอนที่โค้งนอก แต่ในความเป็นจริงนั้น ก ารกัดเซาะจะเกิดที่โค้งนอก และการทับถมของตะกอนจะเกิดขึ้นที่โค้งใน จากปัญหาดังกล่าวทำให้อัตราการตกตะกอนที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีค่าสูง ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์จำเป็นต้องทำให้ขอบตลิ่งมีความ Smooth มากที่สุด เพื่อลดความปั่นป่วนของกระแสน้ำบริเวณขอบตลิ่ง

3. เนื่องจากไม่มีการเก็บบันทึกข้อมูลปริมาณตะกอน ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้ผลที่ได้จากแบบจำลองกายภาพที่มีการศึกษาไว้แล้ว โดยศูนย์วิจัยวิศวกรรมและและการจัดการน้ำ มาใช้ในการปรับเทียบฯ ซึ่งการปรับเทียบผลระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับแบบจำลองกาย ภาพทำได้โดยทำการปรับค่าตัวแปรในแบบจำลองคณิตศาสตร์ จนกว่าจะผลที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองกายภาพมากที่สุด แต่ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีความน่าเชื่อถือมากกว่านี้ ถ้านำผลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มาปรับเทียบกับปริมาณตะกอนที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากภาคสนาม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำจากแบบจำลอง MIKE21 กับแบบจำลองกายภาพ พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองกายภาพ ในช่วงน้ำต่ำมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ ส่วนในช่วงน้ำสูง จะมีน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณตะกอนที่ใส่เข้าไปในแบบจำลองกายภาพมีจำนวนจำกัด ส่วนปริมาณตะกอนในแบบจำลองคณิตศาสตร์จะแปรผันตามกับอัตราการไหลอย่างไม่จำกัด ทั้งนี้เมื่อพิจารณากับสภาพความเป็นจริงในแม่น้ำ ค่าที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองมีค่าสูง เนื่องจากไม่ได้พิจารณาถึงการกระทำของมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น การขุดลอกหรือดูดทรายในแม่น้ำ ซึ่งจะช่วยลด ปริมาณตะกอน และในแต่ละฤดูกาล ปริมาณตะกอนในแม่น้ำจะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลเดียวกัน และปริมาณตะกอนจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนที่ตกในลุ่มน้ำด้วย ซึ่งไม่ได้นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ เพราะฉะนั้น ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำจากแบบจำลอง MIKE21 จะมีค่าอัตราการตกตะกอนที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงของแม่น้ำป่าสักได้ ถ้ามีข้อมูลปริมาณตะกอนที่สมบูรณ์ กล่าวคือ มีข้อมูลปริมาณตะกอนที่ทำการตรวจวัดในทุกช่วงเวลา หรือทุกฤดูกาลในแม่น้ำป่าสัก

5. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-ST พบว่าอัตราการตกตะกอนแต่ละปีไม่เท่ากัน เนื่องจากอัตราการตกตะกอนแปรผันตามอัตราการไหล กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลต่อปีมาก อัตราการตกตะกอนก็มาก แต่ถ้าอัตราการไหลน้อย อัตราการตกตะกอนก็น้อย โดยการไหลแบบ Steady จะให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบ Unsteady โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 29 เนื่องจากการจำลองการไหลแบบ Unsteady จะใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า แต่มีข้อเสีย คือ ใช้ระยะเวลาในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์มากกว่าค่อนข้างมาก โดยการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ความเร็ว 1.80 MH_z แรม 8.00 GB จะใช้เวลาประมาณ 26 วัน ต่อการวิเคราะห์ข้อมู ลรายวันเป็นเวลา 1 ปี และเมื่อพิจารณาค่าอัตราการตกตะกอนเปรียบเทียบกับแม่น้ำอื่นๆ ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ พบว่า ในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาอัตราการตกตะกอนรายปีของแม่น้ำมากนัก ส่วนในต่างประเทศ ได้แก่ ในแม่น้ำอเมซอน และแม่น้ำ Zohreh จะมีอัตราการตกตะกอนรายปีประมาณ 0.0016 และ 0.07 เมตรต่อปีตามลำดับ ซึ่งนับว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแม่น้ำป่าสัก แต่อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จากแม่น้ำทั้งสองแห่งเป็นพื้นที่ปากแม่น้ำที่อยู่ติดกับทะเล ซึ่งแตกต่างจากแม่น้ำป่าสักที่ไหลลงแม่น้ำเจ้าพระยา ส่วนที่เหมือนกันกับงานวิจัยในต่างประเทศคือ อัตราการตกตะกอนจะเกิดในช่วงฤดูน้ำหลากเป็นส่วนใหญ่ เพราะอัตราการตกตะกอนจะแปรผันตามกันกับอัตราการไหล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD/ST เพื่อศึกษาสภาพทางอุทกพลศาสตร์และการเคลื่อนที่ของตะกอนในแม่น้ำป่าสัก พบว่าผลการปรับเทียบ และตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE21-HD พบว่า ค่า Manning'n เท่ากับ 0.0286 ซึ่งทำให้ค่าระดับน้ำที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าตรวจวัดจริงมากที่สุด และผลการวิเคราะห์ตะกอนด้านท้ายเขื่อนพระราม 6 จำนวน 4 แห่ง พบว่า มีค่าเฉลี่ย d_{50} ประมาณ 0.12 มม. ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ย (ρ_s) เท่ากับ 2,650 กก./ลบ.ม. ค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ ยเท่ากับ 0.4 และความเร็วของการตกตะกอน (W_s) เท่ากับ 0.0109 ม./วินาที ต่อมาได้นำแบบจำลอง MIKE21-HD มาปรับเทียบร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-ST โดยใช้การไหลแบบคงที่ในช่วง 100 ถึง 750 ลบ.ม./วินาที ผลการปรับเทียบเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ พบว่า มีอัตราการตกตะกอนอยู่ในช่วง 0.66 ถึง 0.95 ม./ปี ซึ่งอัตราการตกตะกอนจะแปรผันตามอัตราการไหลซึ่งให้ผลสอดคล้องกับแบบจำลองกายภาพ หลังจากนั้น ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD/ST เพื่อวิเคราะห์อัตราการตกตะกอนรายปีในช่วงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550-2555 โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ 1) Steady flow และ 2) Unsteady flow โดยกรณี Steady flow ซึ่งได้จากการสร้างโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและอัตราการตกตะกอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 6 ปี โดยใช้ข้อมูลปริมาณการไหลรายวันที่สถานี S.5 ผลการศึกษาพบว่า อัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.76 ม./ปี ส่วนกรณี Unsteady flow อัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.22 ม./ปี จะเห็นว่าการไหลแบบ Steady จะให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบ Unsteady โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 29 อย่างไรก็ตามค่าอัตราการตกต ะกอนที่วิเคราะห์จากแบบจำลอง MIKE21-HD/ST สามารถนำไปใช้ประเมินปริมาณตะกอนต่อปีและใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการขุดลอกหรือปรับปรุงลำน้ำของหน่วยงานราชการในอนาคตได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

1. แบบจำลอง MIKE21-HD/ST นับว่าเป็นแบบจำลอง ที่สามารถหาอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในแม่น้ำได้ และสามารถแสดงผ ลการคำนวณในรูปแบบคอมพิวเตอร์กรา ฟิก ที่ช่วยให้มองเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ละตำแหน่ง และเวลาต่างๆได้อย่างชัดเจน รวมทั้งมีความเหมาะสมที่จะนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้งานจริง

2. แบบจำลองจะได้รับ ความ เชื่อมั่นก็ต่อเมื่อให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับข้อมูลที่นำมาใช้ ดังนั้นการสร้างแบบจำลองควรรวบรวม และเลือกใช้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจในภาคสนามที่มีความละเอียดและแม่นยำ

3. อัตราการตกตะกอนที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้นจะมีค่ามากกว่าความเป็นจริง เพราะตะกอนที่ใช้ในแบบจำลองใช้เป็นค่าเฉลี่ย แต่ในความเป็นจริง ปริมาณตะกอนจะมีความผันแปรไม่เท่ากันในแต่ละเดือน และขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ประกอบด้วย เช่น การขุดลอก หรือการดูดทรายในแม่น้ำป่าสักด้วย ซึ่งไม่มีการเก็บข้อมูลจึงไม่ได้นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรน้ำ. 2546. **โครงการจัดทำแผนรวมการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ในลุ่มน้ำป่าสัก**; รายงานฉบับสุดท้าย (รายงานหลัก). กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กรมชลประทาน. 2553. **โครงการจัดทำแผนพัฒนาการชลประทานระดับลุ่มน้ำอย่างเป็นระบบ**. ลุ่มน้ำป่าสัก (12). กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ศูนย์วิจัยวิศวกรรมและการจัดการน้ำ(วารี) ภาควิชาวิศวกรรโยธา. 2557. **โครงการศึกษา สำรวจออกแบบป้องกันตลิ่งและการขุดลองเพื่อการเดินเรือในแม่น้ำป่าสัก**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ

ชัยยุทธ ชินณะราศรี. 2550. **กลศาสตร์แม่น้ำและกระบวนการธารน้ำ**. หน่วยงานส่งเสริมการสร้างตำรา กองบริการการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

ณัฐวุฒิ อินทบุตร และ วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ. 2555. **การศึกษาการปรับเทียบแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ของแม่น้ำท่าจีนภายใต้อิทธิพลของระดับน้ำทะเล**. การประชุมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาเกษตรศาสตร์. 9 - 11 พฤษภาคม 2555.

รวิทย์ มีสุข, สุรเจตส์ บุญญาอรุณเนตร, สินีนาฏ ศรีมงคล, ไอศวรรย์ ชั้นกาญจน์ และรอยล จิตรดอน. 2552. **การศึกษาการพัดพาตะกอนในคลองมหาชัยและคลองหลวง จ. สมุทรสาคร**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 13 -15 พฤษภาคม 2552

วราวุธ วุฒิวณิชย์. 2553. **การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ Nash-Sutcliffe Efficiency และ R^2**. ชลกร "วันชูชาติ". 4 มกราคม 2553.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ. 2552. **การจำลองแบบการไหลแบบ 2 มิติด้วยแบบจำลอง MIKE21 HDFM บริเวณพื้นที่ชายฝั่งท่าเรือเมืองดาร์วิน ประเทศออสเตรเลีย**. การประชุมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาเทคโนโลยีสุรนารี. 13 - 15 พฤษภาคม 2552.

_______. 2555. **อุทกวิทยาทางวิศวกรรม (เอกสารประกอบการสอน)**. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

_______. 2556. **การวิเคราะห์และการจำลองระบบทางชลประทาน (เอกสารประกอบการสอน)**. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร. 2554. **สภาพปัญหาด้านน้ำท่วมลุ่มน้ำป่าสัก. ลุ่มน้ำป่าสัก.** แหล่งข้อมูล: http://www.haii.or.th, 2 ธันวาคม 2554.

เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย. 2547. **อุทกวิทยา 1 (เอกสารประกอบการสอน)**. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Bourgoin, L. M., M.P. Bonnet, J.M. Martinez, P.Kosuth, G. Cochonneau, P. Moreira-Turcq, J.L. Guyot, P. Vauchel, N .Filizola and P. Seyler. 2007. Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaı´ floodplain and the Amazon River, Brazil. **Journal of Hydrology**. 335: 140– 156.

Duc, B.M., T. Wenka and W. Rodi. 2004. Numerical Modeling of Bed Deformation in Laboratory Channels. **Journal of Hydraulic Engineering** 130: 894-904.

DHI Water Environment and Health. 2007 a. **MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM, Sand Transport Module, Scientific Documentation**. Denmark.

_______. 2007 b. **MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, Step-by-Step training guide**. Denmark.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

DHI Water Environment and Health. 2007 c. **MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation**. Denmark.

_______. 2007 d. **MIKE 21 ST Non-Cohesive Sediment Transport Module, User Guide**. Denmark.

_______. 2008. **MIKE21 & MIKE3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation**. Denmark.

Gharibreza, M., A. Habibi, S.R. Imamjomeh, and M.A. Ashraf, 2014. **Coastal processes and sedimentary facies in the Zohreh River Delta (Northern Persian Gulf)**. Catena 122: 150–158.

Hardy, R.J., P.D. Bates and M.G. Anderson. 2000. Modelling suspended sediment deposition on a fluvial floodplain using a two-dimensional dynamic finite element model. **Journal of Hydrology.** 229: 202-218.

Poulsen, J.B., F. Hansen, N.B. Ovesen, S.E. Larsen and B. Kronvang, 2013. Linking floodplain hydraulics and sedimentation patterns along a restored river channel: River Odense, Denmark. **The Journal of Ecological Engineering.** 66: 120-128.

Munson, B.R., D.F. Young and T.H. Okiishi. 1990. **Fundamentals of Fluid Mechanics**. Iowa State University. Ames, Iowa, USA.

Van Rijn, L.C. 1984. Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. **Journal of Hydraulic Engineering .** 110: 1431–1456.

Ward, R.C. and M. Robinson. 1990. **Principle of Hydrology**. 3rd edition. Mc-Graw-Hill, London.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Wu, W. and M. ASCE. 2004. Depth-Averaged Two-Dimensional Numerical Modeling of Unsteady Flow and Nonuniform Sediment Transport in Open Channels. **Journal of Hydraulic Engineering.** 130: 1013-1024.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

ข้อมูลปริมาณการไหล และระดับน้ำของสถานีต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลปริมาณการไหล และระดับน้ำของสถานีต่างๆ

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
01-12-2013 00:00:00	32.000	0.72	42.58	1.024	0.9
01-12-2013 01:00:00	22.600	0.63	38.935	0.943	0.8
01-12-2013 02:00:00	17.250	0.55	35.245	0.861	0.72
01-12-2013 03:00:00	15.550	0.51	33.805	0.829	0.65
01-12-2013 04:00:00	19.200	0.58	31.645	0.781	0.57
01-12-2013 05:00:00	43.120	0.82	28.765	0.717	0.54
01-12-2013 06:00:00	63.400	0.98	26.96	0.674	0.62
01-12-2013 07:00:00	98.800	1.08	26.72	0.668	0.78
01-12-2013 08:00:00	121.600	1.18	38.98	0.944	0.88
01-12-2013 09:00:00	138.000	1.24	45.91	1.098	0.98
01-12-2013 10:00:00	147.300	1.27	51.33	1.206	1.08
01-12-2013 11:00:00	148.200	1.27	55.29	1.278	1.16
01-12-2013 12:00:00	136.800	1.24	56.335	1.297	1.2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time (dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
01-12-2013 13:00:00	125.200	1.2	55.51	1.282	1.19
01-12-2013 14:00:00	118.600	1.16	52.76	1.232	1.14
01-12-2013 15:00:00	118.600	1.16	50.2	1.184	1.1
01-12-2013 16:00:00	125.600	1.2	48	1.14	1.07
01-12-2013 17:00:00	137.100	1.24	46.85	1.117	1.05
01-12-2013 18:00:00	137.100	1.24	47.45	1.129	1.07
01-12-2013 19:00:00	123.600	1.19	50	1.18	1.1
01-12-2013 20:00:00	106.800	1.1	51.715	1.213	1.1
01-12-2013 21:00:00	71.600	1.01	50.5	1.19	1.07
01-12-2013 22:00:00	54.560	0.91	47.7	1.134	1.01
01-12-2013 23:00:00	41.300	0.81	44.515	1.067	0.94
02-12-2013 00:00:00	29.300	0.69	41.23	0.994	0.87
02-12-2013 01:00:00	19.050	0.58	37.81	0.918	0.77

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
02-12-2013 02:00:00	13.750	0.48	34.615	0.847	0.69
02-12-2013 03:00:00	9.490	0.38	33.22	0.816	0.6
02-12-2013 04:00:00	8.350	0.35	30.7	0.76	0.51
02-12-2013 05:00:00	14.250	0.49	28.27	0.706	0.43
02-12-2013 06:00:00	35.600	0.76	27.2	0.68	0.36
02-12-2013 07:00:00	54.950	0.92	26.64	0.666	0.52
02-12-2013 08:00:00	77.600	1.03	26.28	0.657	0.68
02-12-2013 09:00:00	111.600	1.13	30.295	0.751	0.82
02-12-2013 10:00:00	125.200	1.2	42.265	1.017	0.92
02-12-2013 11:00:00	129.900	1.21	47.95	1.139	1.03
02-12-2013 12:00:00	121.400	1.18	52.595	1.229	1.1
02-12-2013 13:00:00	101.600	1.09	54.355	1.261	1.12
02-12-2013 14:00:00	75.600	1.02	52.1	1.22	1.07

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
02-12-2013 15:00:00	65.090	0.99	48.1	1.142	1
02-12-2013 16:00:00	80.800	1.04	44.74	1.072	0.95
02-12-2013 17:00:00	112.600	1.13	42.04	1.012	0.92
02-12-2013 18:00:00	132.600	1.22	40.96	0.988	0.93
02-12-2013 19:00:00	136.500	1.24	43.57	1.046	1.03
02-12-2013 20:00:00	120.000	1.17	50.75	1.195	1.09
02-12-2013 21:00:00	92.800	1.07	55.235	1.277	1.1
02-12-2013 22:00:00	60.670	0.96	53.365	1.243	1.06
02-12-2013 23:00:00	46.890	0.85	48.8	1.156	1
03-12-2013 00:00:00	34.000	0.74	44.56	1.068	0.91
03-12-2013 01:00:00	23.100	0.63	40.87	0.986	0.82
03-12-2013 02:00:00	16.000	0.52	36.865	0.897	0.72
03-12-2013 03:00:00	10.850	0.42	34.345	0.841	0.63

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
03-12-2013 04:00:00	8.050	0.34	32.185	0.793	0.5
03-12-2013 05:00:00	7.900	0.33	29.125	0.725	0.45
03-12-2013 06:00:00	24.500	0.65	27.04	0.676	0.37
03-12-2013 07:00:00	49.750	0.88	26.2	0.655	0.4
03-12-2013 08:00:00	68.000	1.01	25.76	0.644	0.63
03-12-2013 09:00:00	111.800	1.13	26.32	0.658	0.78
03-12-2013 10:00:00	132.300	1.22	40.6	0.98	0.89
03-12-2013 11:00:00	153.900	1.29	47.4	1.128	1
03-12-2013 12:00:00	163.425	1.33	53.475	1.245	1.13
03-12-2013 13:00:00	161.225	1.32	58.425	1.335	1.2
03-12-2013 14:00:00	138.300	1.24	61.01	1.382	1.23
03-12-2013 15:00:00	121.000	1.18	59.25	1.35	1.22
03-12-2013 16:00:00	118.600	1.16	55.51	1.282	1.15

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	**สถานี S.5**		**สถานี S.26**		**สถานีนครหลวง**
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	**ปริมาณการไหล (m^3/s)**	**ระดับน้ำ (m)**	**ปริมาณการไหล (m^3/s)**	**ระดับน้ำ (m)**	**ระดับน้ำ (m)**
03-12-2013 17:00:00	132.300	1.22	51.935	1.217	1.09
03-12-2013 18:00:00	160.675	1.32	49.1	1.162	1.06
03-12-2013 19:00:00	172.225	1.36	49.05	1.161	1.12
03-12-2013 20:00:00	171.675	1.36	53.145	1.239	1.19
03-12-2013 21:00:00	144.300	1.26	59.745	1.359	1.23
03-12-2013 22:00:00	112.400	1.13	61.78	1.396	1.23
03-12-2013 23:00:00	74.400	1.02	58.37	1.334	1.16
04-12-2013 00:00:00	53.910	0.91	53.09	1.238	1.08
04-12-2013 01:00:00	39.600	0.8	48.4	1.148	0.99
04-12-2013 02:00:00	28.200	0.68	44.245	1.061	0.9
04-12-2013 03:00:00	18.350	0.57	40.285	0.973	0.8
04-12-2013 04:00:00	12.750	0.46	36.325	0.885	0.71
04-12-2013 05:00:00	8.440	0.35	34.075	0.835	0.61

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
04-12-2013 06:00:00	8.020	0.33	31.96	0.788	0.52
04-12-2013 07:00:00	24.800	0.65	29.305	0.729	0.44
04-12-2013 08:00:00	51.830	0.89	27.44	0.686	0.42
04-12-2013 09:00:00	74.800	1.02	26.56	0.664	0.64
04-12-2013 10:00:00	112.600	1.13	27.12	0.678	0.79
04-12-2013 11:00:00	135.300	1.23	41.14	0.992	0.9
04-12-2013 12:00:00	153.900	1.29	47.55	1.131	1.01
04-12-2013 13:00:00	151.200	1.28	54.41	1.262	1.13
04-12-2013 14:00:00	129.000	1.21	58.15	1.33	1.18
04-12-2013 15:00:00	112.200	1.13	58.425	1.335	1.18
04-12-2013 16:00:00	99.600	1.08	55.29	1.278	1.12
04-12-2013 17:00:00	94.800	1.07	51.11	1.202	1.05
04-12-2013 18:00:00	112.000	1.13	47.45	1.129	1.01

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time (dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
04-12-2013 19:00:00	134.400	1.23	44.92	1.076	0.99
04-12-2013 20:00:00	146.700	1.27	45.145	1.081	1.04
04-12-2013 21:00:00	135.600	1.23	49.15	1.163	1.11
04-12-2013 22:00:00	106.600	1.1	54.685	1.267	1.14
04-12-2013 23:00:00	63.920	0.98	55.51	1.282	1.1
05-12-2013 00:00:00	49.620	0.87	50.9	1.198	1.02
05-12-2013 01:00:00	36.300	0.76	46.5	1.11	0.94
05-12-2013 02:00:00	24.600	0.65	42.535	1.023	0.86
05-12-2013 03:00:00	16.450	0.53	38.665	0.937	0.76
05-12-2013 04:00:00	10.350	0.41	34.705	0.849	0.66
05-12-2013 05:00:00	8.500	0.35	33.67	0.826	0.57
05-12-2013 06:00:00	6.700	0.29	31.33	0.774	0.47
05-12-2013 07:00:00	8.200	0.34	29.26	0.728	0.38

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time (dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	สถานี S.5 ปริมาณการไหล (m^3/s)	สถานี S.5 ระดับน้ำ (m)	สถานี S.26 ปริมาณการไหล (m^3/s)	สถานี S.26 ระดับน้ำ (m)	สถานีนครหลวง ระดับน้ำ (m)
05-12-2013 08:00:00	29.200	0.69	27.8	0.695	0.3
05-12-2013 09:00:00	50.010	0.88	27.08	0.677	0.44
05-12-2013 10:00:00	69.600	1.01	26.64	0.666	0.63
05-12-2013 11:00:00	112.600	1.13	27.32	0.683	0.77
05-12-2013 12:00:00	134.700	1.23	41.05	0.99	0.88
05-12-2013 13:00:00	150.300	1.28	48.75	1.155	1.01
05-12-2013 14:00:00	145.800	1.27	54.355	1.261	1.12
05-12-2013 15:00:00	118.600	1.16	57.6	1.32	1.2
05-12-2013 16:00:00	104.800	1.1	58.15	1.33	1.2
05-12-2013 17:00:00	92.000	1.07	53.805	1.251	1.14
05-12-2013 18:00:00	107.600	1.11	49.75	1.175	1.07
05-12-2013 19:00:00	131.400	1.22	46.7	1.114	1.03
05-12-2013 20:00:00	158.750	1.31	45.64	1.092	1.04

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
05-12-2013 21:00:00	166.175	1.34	48.25	1.145	1.13
05-12-2013 22:00:00	156.550	1.3	55.73	1.286	1.2
05-12-2013 23:00:00	118.800	1.16	60.845	1.379	1.23
06-12-2013 00:00:00	85.600	1.05	60.24	1.368	1.21
06-12-2013 01:00:00	57.550	0.94	55.235	1.277	1.14
06-12-2013 02:00:00	42.600	0.82	50.15	1.183	1.06
06-12-2013 03:00:00	30.100	0.7	45.64	1.092	0.96
06-12-2013 04:00:00	19.100	0.58	41.635	1.003	0.87
06-12-2013 05:00:00	13.150	0.46	37.72	0.916	0.77
06-12-2013 06:00:00	8.470	0.35	34.525	0.845	0.67
06-12-2013 07:00:00	7.750	0.33	32.905	0.809	0.58
06-12-2013 08:00:00	17.550	0.55	30.34	0.752	0.48
06-12-2013 09:00:00	45.980	0.85	27.92	0.698	0.42

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
06-12-2013 10:00:00	65.740	1	26.6	0.665	0.59
06-12-2013 11:00:00	112.600	1.13	26.56	0.664	0.76
06-12-2013 12:00:00	140.400	1.25	39.25	0.95	0.88
06-12-2013 13:00:00	164.525	1.33	46.7	1.114	1
06-12-2013 14:00:00	172.775	1.36	53.475	1.245	1.1
06-12-2013 15:00:00	164.250	1.33	59.855	1.361	1.18
06-12-2013 16:00:00	141.300	1.25	62.44	1.408	1.24
06-12-2013 17:00:00	125.000	1.2	61.285	1.387	1.23
06-12-2013 18:00:00	123.600	1.19	57.545	1.319	1.16
06-12-2013 19:00:00	150.600	1.28	53.695	1.249	1.1
06-12-2013 20:00:00	179.100	1.38	50.7	1.194	1.05
06-12-2013 21:00:00	192.025	1.43	51.22	1.204	1.13
06-12-2013 22:00:00	196.700	1.45	57.82	1.324	1.21

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
06-12-2013 23:00:00	177.450	1.38	64.365	1.443	1.29
07-12-2013 00:00:00	137.700	1.24	67.17	1.494	1.33
07-12-2013 01:00:00	109.800	1.12	64.475	1.445	1.28
07-12-2013 02:00:00	66.400	1	59.305	1.351	1.22
07-12-2013 03:00:00	50.920	0.88	53.97	1.254	1.13
07-12-2013 04:00:00	36.700	0.77	49.05	1.161	1.04
07-12-2013 05:00:00	25.100	0.65	44.695	1.071	0.94
07-12-2013 06:00:00	16.800	0.54	40.555	0.979	0.82
07-12-2013 07:00:00	11.550	0.43	36.685	0.893	0.72
07-12-2013 08:00:00	10.800	0.42	34.39	0.842	0.62
07-12-2013 09:00:00	35.900	0.76	32.86	0.808	0.53
07-12-2013 10:00:00	64.570	0.99	30.475	0.755	0.5
07-12-2013 11:00:00	109.000	1.12	28.855	0.719	0.58

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time (dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	สถานี S.5 ปริมาณการไหล (m^3/s)	สถานี S.5 ระดับน้ำ (m)	สถานี S.26 ปริมาณการไหล (m^3/s)	สถานี S.26 ระดับน้ำ (m)	สถานีนครหลวง ระดับน้ำ (m)
07-12-2013 12:00:00	132.900	1.22	37.045	0.901	0.72
07-12-2013 13:00:00	162.875	1.33	45.415	1.087	0.88
07-12-2013 14:00:00	173.600	1.36	52.21	1.222	1
07-12-2013 15:00:00	169.750	1.35	58.59	1.338	1.14
07-12-2013 16:00:00	144.000	1.26	62.605	1.411	1.26
07-12-2013 17:00:00	121.600	1.18	62.11	1.402	1.22
07-12-2013 18:00:00	109.600	1.12	58.37	1.334	1.04
07-12-2013 19:00:00	110.600	1.12	54.19	1.258	0.88
07-12-2013 20:00:00	124.400	1.19	50.15	1.183	0.72
07-12-2013 21:00:00	149.100	1.28	47.5	1.13	0.54
07-12-2013 22:00:00	160.125	1.32	47.3	1.126	0.57
07-12-2013 23:00:00	152.100	1.29	51.495	1.209	0.67
08-12-2013 00:00:00	121.400	1.18	56.94	1.308	0.8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
08-12-2013 01:00:00	90.400	1.06	58.15	1.33	0.78
08-12-2013 02:00:00	59.110	0.95	54.63	1.266	0.75
08-12-2013 03:00:00	44.030	0.83	49.9	1.178	0.73
08-12-2013 04:00:00	30.900	0.71	45.73	1.094	0.69
08-12-2013 05:00:00	19.550	0.59	41.86	1.008	0.63
08-12-2013 06:00:00	13.600	0.47	38.035	0.923	0.58
08-12-2013 07:00:00	8.770	0.36	34.615	0.847	0.54
08-12-2013 08:00:00	7.720	0.32	33.76	0.828	0.5
08-12-2013 09:00:00	8.470	0.35	32.23	0.794	0.47
08-12-2013 10:00:00	29.400	0.69	30.385	0.753	0.39
08-12-2013 11:00:00	51.570	0.89	28.9	0.72	0.5
08-12-2013 12:00:00	65.740	1	27.88	0.697	0.68
08-12-2013 13:00:00	109.400	1.12	28.315	0.707	0.8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
08-12-2013 14:00:00	125.600	1.2	41.14	0.992	0.92
08-12-2013 15:00:00	133.200	1.22	46.9	1.118	1.02
08-12-2013 16:00:00	118.400	1.16	52.595	1.229	1.11
08-12-2013 17:00:00	82.800	1.04	55.4	1.28	1.14
08-12-2013 18:00:00	60.540	0.96	53.09	1.238	1.09
08-12-2013 19:00:00	53.130	0.9	48.65	1.153	1.02
08-12-2013 20:00:00	50.660	0.88	44.65	1.07	0.95
08-12-2013 21:00:00	54.690	0.91	41.41	0.998	0.9
08-12-2013 22:00:00	64.960	0.99	38.8	0.94	0.85
08-12-2013 23:00:00	90.400	1.06	37.135	0.903	0.86
09-12-2013 00:00:00	75.200	1.02	38.035	0.923	0.93
09-12-2013 01:00:00	55.860	0.92	41.86	1.008	0.96
09-12-2013 02:00:00	42.600	0.82	43.615	1.047	0.94

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
09-12-2013 03:00:00	30.800	0.71	41.365	0.997	0.87
09-12-2013 04:00:00	19.800	0.6	38.125	0.925	0.8
09-12-2013 05:00:00	13.950	0.48	34.885	0.853	0.72
09-12-2013 06:00:00	8.920	0.36	34.075	0.835	0.63
09-12-2013 07:00:00	7.720	0.32	32.635	0.803	0.54
09-12-2013 08:00:00	6.400	0.28	30.835	0.763	0.45
09-12-2013 09:00:00	7.570	0.32	29.44	0.732	0.36
09-12-2013 10:00:00	16.750	0.54	28.27	0.706	0.28
09-12-2013 11:00:00	35.000	0.75	27.36	0.684	0.32
09-12-2013 12:00:00	50.920	0.88	26.68	0.667	0.53
09-12-2013 13:00:00	70.800	1.01	26.36	0.659	0.66
09-12-2013 14:00:00	110.400	1.12	30.655	0.759	0.78
09-12-2013 15:00:00	124.200	1.19	41.995	1.011	0.9

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
09-12-2013 16:00:00	125.600	1.2	47.8	1.136	1.03
09-12-2013 17:00:00	106.000	1.1	52.54	1.228	1.09
09-12-2013 18:00:00	62.100	0.97	54.245	1.259	1.1
09-12-2013 19:00:00	50.920	0.88	50.55	1.191	1.03
09-12-2013 20:00:00	42.080	0.82	46.05	1.101	0.95
09-12-2013 21:00:00	37.000	0.77	42.085	1.013	0.87
09-12-2013 22:00:00	36.200	0.76	38.485	0.933	0.8
09-12-2013 23:00:00	39.800	0.8	35.38	0.864	0.78
10-12-2013 00:00:00	46.240	0.85	34.39	0.842	0.74
10-12-2013 01:00:00	42.730	0.82	33.895	0.831	0.74
10-12-2013 02:00:00	34.800	0.75	33.49	0.822	0.75
10-12-2013 03:00:00	24.400	0.64	33.355	0.819	0.74
10-12-2013 04:00:00	17.150	0.54	33.175	0.815	0.69

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
10-12-2013 05:00:00	11.650	0.43	32.725	0.805	0.62
10-12-2013 06:00:00	7.780	0.33	32.095	0.791	0.54
10-12-2013 07:00:00	7.600	0.32	30.79	0.762	0.44
10-12-2013 08:00:00	6.100	0.27	29.665	0.737	0.38
10-12-2013 09:00:00	3.400	0.17	28.675	0.715	0.29
10-12-2013 10:00:00	6.700	0.29	27.88	0.697	0.21
10-12-2013 11:00:00	15.650	0.51	27.28	0.682	0.18
10-12-2013 12:00:00	28.300	0.68	26.84	0.671	0.3
10-12-2013 13:00:00	40.910	0.81	26.52	0.663	0.46
10-12-2013 14:00:00	57.420	0.93	26.28	0.657	0.58
10-12-2013 15:00:00	76.000	1.03	26.88	0.672	0.69
10-12-2013 16:00:00	90.800	1.06	38.98	0.944	0.83
10-12-2013 17:00:00	69.200	1.01	44.155	1.059	0.92

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
10-12-2013 18:00:00	48.45	0.87	47.30	1.13	0.97
10-12-2013 19:00:00	37.50	0.78	46.05	1.10	0.93
10-12-2013 20:00:00	28.90	0.69	42.22	1.02	0.84
10-12-2013 21:00:00	22.10	0.62	38.44	0.93	0.76
10-12-2013 22:00:00	18.30	0.57	34.75	0.85	0.69
10-12-2013 23:00:00	18.00	0.56	34.53	0.85	0.62
11-12-2013 00:00:00	24.00	0.64	33.99	0.83	0.56
11-12-2013 01:00:00	33.00	0.73	32.32	0.80	0.55
11-12-2013 02:00:00	35.50	0.76	30.66	0.76	0.60
11-12-2013 03:00:00	31.60	0.72	29.53	0.73	0.66
11-12-2013 04:00:00	23.50	0.64	29.22	0.73	0.68
11-12-2013 05:00:00	17.60	0.55	29.44	0.73	0.65
11-12-2013 06:00:00	12.50	0.45	29.44	0.73	0.59

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time (dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
11-12-2013 07:00:00	8.83	0.36	28.81	0.72	0.53
11-12-2013 08:00:00	7.60	0.32	27.72	0.69	0.46
11-12-2013 09:00:00	7.54	0.32	26.92	0.67	0.40
11-12-2013 10:00:00	9.49	0.38	26.40	0.66	0.34
11-12-2013 11:00:00	16.05	0.52	25.92	0.65	0.30
11-12-2013 12:00:00	26.700	0.67	25.56	0.639	0.38
11-12-2013 13:00:00	39.400	0.79	25.36	0.634	0.54
11-12-2013 14:00:00	55.210	0.92	25.8	0.645	0.67
11-12-2013 15:00:00	70.400	1.01	37.54	0.912	0.78
11-12-2013 16:00:00	91.200	1.06	43.39	1.042	0.9
11-12-2013 17:00:00	83.200	1.04	48.8	1.156	1
11-12-2013 18:00:00	54.300	0.91	52.155	1.221	1.08
11-12-2013 19:00:00	38.400	0.78	52.045	1.219	1.07

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
11-12-2013 20:00:00	28.800	0.69	47.85	1.137	0.98
11-12-2013 21:00:00	19.650	0.59	43.48	1.044	0.89
11-12-2013 22:00:00	15.150	0.5	39.295	0.951	0.81
11-12-2013 23:00:00	11.200	0.42	35.47	0.866	0.72
12-12-2013 00:00:00	9.130	0.37	34.21	0.838	0.63
12-12-2013 01:00:00	9.040	0.37	33.175	0.815	0.56
12-12-2013 02:00:00	10.400	0.41	31.78	0.784	0.5
12-12-2013 03:00:00	12.850	0.46	30.34	0.752	0.48
12-12-2013 04:00:00	13.050	0.46	29.08	0.724	0.39
12-12-2013 05:00:00	10.600	0.41	28.09	0.702	0.49
12-12-2013 06:00:00	8.830	0.36	27.36	0.684	0.5
12-12-2013 07:00:00	7.360	0.31	26.8	0.67	0.46
12-12-2013 08:00:00	6.280	0.28	26.4	0.66	0.44

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
12-12-2013 09:00:00	5.710	0.26	26.08	0.652	0.38
12-12-2013 10:00:00	6.730	0.29	25.88	0.647	0.35
12-12-2013 11:00:00	12.200	0.44	25.68	0.642	0.34
12-12-2013 12:00:00	19.450	0.59	25.56	0.639	0.36
12-12-2013 13:00:00	30.300	0.7	25.2	0.63	0.49
12-12-2013 14:00:00	42.080	0.82	25.16	0.629	0.6
12-12-2013 15:00:00	55.210	0.92	32.32	0.796	0.7
12-12-2013 16:00:00	63.010	0.98	39.7	0.96	0.81
12-12-2013 17:00:00	64.440	0.99	44.515	1.067	0.92
12-12-2013 18:00:00	49.360	0.87	48.55	1.151	0.99
12-12-2013 19:00:00	33.300	0.73	49.45	1.169	0.98
12-12-2013 20:00:00	21.700	0.62	46	1.1	0.92
12-12-2013 21:00:00	15.650	0.51	41.77	1.006	0.82

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
12-12-2013 22:00:00	10.000	0.4	37.675	0.915	0.73
12-12-2013 23:00:00	6.580	0.29	34.525	0.845	0.64
13-12-2013 00:00:00	4.600	0.22	32.725	0.805	0.54
13-12-2013 01:00:00	3.000	0.15	29.845	0.741	0.45
13-12-2013 02:00:00	3.400	0.17	27.48	0.687	0.37
13-12-2013 03:00:00	5.680	0.26	26.28	0.657	0.29
13-12-2013 04:00:00	11.500	0.43	25.68	0.642	0.27
13-12-2013 05:00:00	16.250	0.53	25.32	0.633	0.36
13-12-2013 06:00:00	19.800	0.6	25.08	0.627	0.48
13-12-2013 07:00:00	25.500	0.66	25.04	0.626	0.57
13-12-2013 08:00:00	28.500	0.69	28	0.7	0.64
13-12-2013 09:00:00	31.100	0.71	31.42	0.776	0.7
13-12-2013 10:00:00	31.700	0.72	35.155	0.859	0.76

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
13-12-2013 11:00:00	34.000	0.74	23.79	0.594	0.77
13-12-2013 12:00:00	38.600	0.79	23.615	0.589	0.77
13-12-2013 13:00:00	48.970	0.87	23.51	0.586	0.78
13-12-2013 14:00:00	59.500	0.95	23.79	0.594	0.82
13-12-2013 15:00:00	76.000	1.03	26.84	0.671	0.88
13-12-2013 16:00:00	97.200	1.08	31.735	0.783	0.95
13-12-2013 17:00:00	106.000	1.1	36.595	0.891	1.03
13-12-2013 18:00:00	90.800	1.06	40.375	0.975	1.08
13-12-2013 19:00:00	58.460	0.94	41.05	0.99	1.11
13-12-2013 20:00:00	43.120	0.82	39.25	0.95	1.07
13-12-2013 21:00:00	30.500	0.71	37.315	0.907	0.99
13-12-2013 22:00:00	19.350	0.59	37.315	0.907	0.9
13-12-2013 23:00:00	13.400	0.47	37.315	0.907	0.8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
14-12-2013 00:00:00	8.530	0.35	36.145	0.881	0.7
14-12-2013 01:00:00	5.470	0.25	31.555	0.779	0.6
14-12-2013 02:00:00	4.240	0.21	29.71	0.738	0.5
14-12-2013 03:00:00	4.210	0.21	29.665	0.737	0.42
14-12-2013 04:00:00	9.190	0.37	27.8	0.695	0.34
14-12-2013 05:00:00	18.350	0.57	27.08	0.677	0.32
14-12-2013 06:00:00	27.700	0.68	26.64	0.666	0.48
14-12-2013 07:00:00	36.900	0.77	27.32	0.683	0.6
14-12-2013 08:00:00	46.110	0.85	41.05	0.99	0.69
14-12-2013 09:00:00	52.350	0.9	48.75	1.155	0.78
14-12-2013 10:00:00	55.600	0.92	54.355	1.261	0.87
14-12-2013 11:00:00	53.650	0.91	52.925	1.235	0.94
14-12-2013 12:00:00	51.830	0.89	52.155	1.221	0.96

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time (dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
14-12-2013 13:00:00	48.450	0.87	50.75	1.195	0.96
14-12-2013 14:00:00	48.580	0.87	50.8	1.196	0.91
14-12-2013 15:00:00	55.340	0.92	53.64	1.248	0.88
14-12-2013 16:00:00	62.880	0.98	56.83	1.306	0.87
14-12-2013 17:00:00	71.200	1.01	58.865	1.343	0.91
14-12-2013 18:00:00	70.000	1.01	58.7	1.34	0.97
14-12-2013 19:00:00	57.030	0.93	54.355	1.261	1
14-12-2013 20:00:00	42.080	0.82	48.3	1.146	1
14-12-2013 21:00:00	30.300	0.7	42.985	1.033	0.94
14-12-2013 22:00:00	19.450	0.59	37.855	0.919	0.86
14-12-2013 23:00:00	13.550	0.47	32.545	0.801	0.77
15-12-2013 00:00:00	8.410	0.35	27.08	0.677	0.68
15-12-2013 01:00:00	4.960	0.23	22.67	0.562	0.58

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
15-12-2013 02:00:00	3.800	0.19	21.2	0.52	0.48
15-12-2013 03:00:00	3.400	0.17	20.5	0.5	0.39
15-12-2013 04:00:00	4.600	0.22	34.84	0.852	0.29
15-12-2013 05:00:00	8.800	0.36	30.7	0.76	0.22
15-12-2013 06:00:00	17.650	0.55	27.2	0.68	0.24
15-12-2013 07:00:00	27.500	0.68	25.64	0.641	0.44
15-12-2013 08:00:00	37.700	0.78	24	0.6	0.57
15-12-2013 09:00:00	49.100	0.87	24.8	0.62	0.67
15-12-2013 10:00:00	55.990	0.92	25.72	0.643	0.78
15-12-2013 11:00:00	57.420	0.93	28	0.7	0.88
15-12-2013 12:00:00	54.170	0.91	35.785	0.873	0.93
15-12-2013 13:00:00	47.670	0.86	43.57	1.046	0.94
15-12-2013 14:00:00	44.680	0.84	50.1	1.182	0.92

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
15-12-2013 15:00:00	46.630	0.85	54.575	1.265	0.86
15-12-2013 16:00:00	55.340	0.92	55.18	1.276	0.84
15-12-2013 17:00:00	64.440	0.99	49.9	1.178	0.84
15-12-2013 18:00:00	73.600	1.02	44.65	1.07	0.91
15-12-2013 19:00:00	65.740	1	40.78	0.984	0.96
15-12-2013 20:00:00	55.080	0.92	37.945	0.921	0.98
15-12-2013 21:00:00	40.130	0.8	36.325	0.885	0.97
15-12-2013 22:00:00	28.600	0.69	37.585	0.913	0.91
15-12-2013 23:00:00	18.550	0.57	43.39	1.042	0.82
16-12-2013 00:00:00	12.650	0.45	49.2	1.164	0.73
16-12-2013 01:00:00	8.050	0.34	50.65	1.193	0.63
16-12-2013 02:00:00	4.630	0.22	46.45	1.109	0.54
16-12-2013 03:00:00	3.400	0.17	41.68	1.004	0.44

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time (dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	สถานี S.5 ปริมาณการไหล (m^3/s)	สถานี S.5 ระดับน้ำ (m)	สถานี S.26 ปริมาณการไหล (m^3/s)	สถานี S.26 ระดับน้ำ (m)	สถานีนครหลวง ระดับน้ำ (m)
16-12-2013 04:00:00	3.000	0.15	37.45	0.91	0.35
16-12-2013 05:00:00	8.500	0.35	33.4	0.82	0.25
16-12-2013 06:00:00	13.800	0.48	29.62	0.736	0.2
16-12-2013 07:00:00	23.200	0.63	25.92	0.648	0.37
16-12-2013 08:00:00	34.900	0.75	24	0.6	0.53
16-12-2013 09:00:00	47.930	0.86	23.3	0.58	0.64
16-12-2013 10:00:00	60.410	0.96	24.8	0.62	0.76
16-12-2013 11:00:00	72.000	1.02	28	0.7	0.9
16-12-2013 12:00:00	76.800	1.03	33.625	0.825	0.98
16-12-2013 13:00:00	65.610	1	41.545	1.001	1.03
16-12-2013 14:00:00	59.760	0.95	48.6	1.152	1.03
16-12-2013 15:00:00	57.680	0.94	54.63	1.266	0.99
16-12-2013 16:00:00	60.280	0.96	56.83	1.306	0.95

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
16-12-2013 17:00:00	76.000	1.03	53.695	1.249	0.94
16-12-2013 18:00:00	101.200	1.09	46.65	1.113	0.95
16-12-2013 19:00:00	103.600	1.09	41.95	1.01	1.02
16-12-2013 20:00:00	82.400	1.04	37.99	0.922	1.05
16-12-2013 21:00:00	57.940	0.94	34.705	0.849	1.05
16-12-2013 22:00:00	41.560	0.81	32.005	0.789	0.99
16-12-2013 23:00:00	29.500	0.7	31.375	0.775	0.92
17-12-2013 00:00:00	18.850	0.58	35.065	0.857	0.82
17-12-2013 01:00:00	12.950	0.46	40.69	0.982	0.73
17-12-2013 02:00:00	8.260	0.34	41.68	1.004	0.64
17-12-2013 03:00:00	4.750	0.23	38.125	0.925	0.54
17-12-2013 04:00:00	2.600	0.13	34.165	0.837	0.44
17-12-2013 05:00:00	0.600	0.03	30.43	0.754	0.35

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
17-12-2013 06:00:00	5.800	0.26	26.96	0.674	0.26
17-12-2013 07:00:00	15.050	0.5	25.2	0.63	0.2
17-12-2013 08:00:00	23.600	0.64	24	0.6	0.38
17-12-2013 09:00:00	33.900	0.74	23.3	0.58	0.54
17-12-2013 10:00:00	42.210	0.82	24.4	0.61	0.65
17-12-2013 11:00:00	52.870	0.9	26	0.65	0.75
17-12-2013 12:00:00	52.220	0.89	28.9	0.72	0.85
17-12-2013 13:00:00	38.000	0.78	35.47	0.866	0.94
17-12-2013 14:00:00	29.400	0.69	42.535	1.023	0.92
17-12-2013 15:00:00	22.600	0.63	48.65	1.153	0.84
17-12-2013 16:00:00	18.350	0.57	52.65	1.23	0.75
17-12-2013 17:00:00	17.950	0.56	50.85	1.197	0.69
17-12-2013 18:00:00	22.300	0.62	44.92	1.076	0.64

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
17-12-2013 19:00:00	32.200	0.72	40.285	0.973	0.63
17-12-2013 20:00:00	37.200	0.77	36.01	0.878	0.67
17-12-2013 21:00:00	32.900	0.73	32.275	0.795	0.74
17-12-2013 22:00:00	20.800	0.61	29.125	0.725	0.77
17-12-2013 23:00:00	14.250	0.49	26.64	0.666	0.74
18-12-2013 00:00:00	9.010	0.37	26.08	0.652	0.67
18-12-2013 01:00:00	2.200	0.11	30.16	0.748	0.59
18-12-2013 02:00:00	1.600	0.08	36.325	0.885	0.5
18-12-2013 03:00:00	0.000	0	38.53	0.934	0.42
18-12-2013 04:00:00	#N/A	-0.03	35.965	0.877	0.32
18-12-2013 05:00:00	0.600	0.03	31.6	0.78	0.22
18-12-2013 06:00:00	1.400	0.07	28.315	0.707	0.17
18-12-2013 07:00:00	4.300	0.21	25.2	0.63	0.16

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time (dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
18-12-2013 08:00:00	8.350	0.35	24	0.6	0.16
18-12-2013 09:00:00	14.000	0.48	22.95	0.57	0.29
18-12-2013 10:00:00	21.100	0.61	23.65	0.59	0.43
18-12-2013 11:00:00	32.400	0.72	25.68	0.642	0.55
18-12-2013 12:00:00	39.800	0.8	30.25	0.75	0.67
18-12-2013 13:00:00	42.210	0.82	36.955	0.899	0.78
18-12-2013 14:00:00	36.300	0.76	44.56	1.068	0.85
18-12-2013 15:00:00	28.400	0.68	50.1	1.182	0.86
18-12-2013 16:00:00	25.300	0.65	53.695	1.249	0.81
18-12-2013 17:00:00	24.300	0.64	52.595	1.229	0.78
18-12-2013 18:00:00	32.200	0.72	46.5	1.11	0.73
18-12-2013 19:00:00	41.560	0.81	41.455	0.999	0.73
18-12-2013 20:00:00	45.720	0.84	36.955	0.899	0.8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time (dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	สถานี S.5 ปริมาณการไหล (m^3/s)	สถานี S.5 ระดับน้ำ (m)	สถานี S.26 ปริมาณการไหล (m^3/s)	สถานี S.26 ระดับน้ำ (m)	สถานีนครหลวง ระดับน้ำ (m)
18-12-2013 21:00:00	42.340	0.82	32.995	0.811	0.86
18-12-2013 22:00:00	31.400	0.71	29.215	0.727	0.88
18-12-2013 23:00:00	20.600	0.61	26.04	0.651	0.86
19-12-2013 00:00:00	14.550	0.49	24	0.6	0.79
19-12-2013 01:00:00	9.160	0.37	22.6	0.56	0.71
19-12-2013 02:00:00	5.680	0.26	21.2	0.52	0.62
19-12-2013 03:00:00	2.800	0.14	20.5	0.5	0.53
19-12-2013 04:00:00	0.200	0.01	19.8	0.48	0.44
19-12-2013 05:00:00	#N/A	-0.11	19.45	0.47	0.35
19-12-2013 06:00:00	1.600	0.08	19.1	0.46	0.25
19-12-2013 07:00:00	5.800	0.26	19.45	0.47	0.19
19-12-2013 08:00:00	10.250	0.41	20.15	0.49	0.18
19-12-2013 09:00:00	16.950	0.54	20.5	0.5	0.35

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
19-12-2013 10:00:00	27.200	0.67	21.2	0.52	0.5
19-12-2013 11:00:00	40.000	0.8	22.6	0.56	0.61
19-12-2013 12:00:00	52.480	0.9	24.4	0.61	0.71
19-12-2013 13:00:00	60.280	0.96	27.2	0.68	0.84
19-12-2013 14:00:00	61.840	0.97	31.24	0.772	0.94
19-12-2013 15:00:00	56.770	0.93	37.81	0.918	0.99
19-12-2013 22:00:00	76.000	1.03	25.64	0.641	1.09
19-12-2013 23:00:00	53.260	0.9	24	0.6	1.1
20-12-2013 00:00:00	38.700	0.79	23.3	0.58	1.05
20-12-2013 01:00:00	26.600	0.67	22.6	0.56	0.97
20-12-2013 02:00:00	17.250	0.55	21.9	0.54	0.88
20-12-2013 03:00:00	11.250	0.43	21.2	0.52	0.78
20-12-2013 04:00:00	7.030	0.3	20.5	0.5	0.68

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
20-12-2013 05:00:00	0.200	0.01	20.85	0.51	0.58
20-12-2013 06:00:00	3.800	0.19	21.55	0.53	0.48
20-12-2013 07:00:00	8.800	0.36	22.6	0.56	0.39
20-12-2013 08:00:00	17.000	0.54	23.65	0.59	0.32
20-12-2013 09:00:00	31.200	0.71	24.8	0.62	0.43
20-12-2013 10:00:00	43.120	0.82	26.4	0.66	0.6
20-12-2013 11:00:00	57.550	0.94	28.9	0.72	0.72
20-12-2013 12:00:00	78.000	1.03	32.5	0.8	0.82
20-12-2013 13:00:00	102.800	1.09	36.64	0.892	0.94
20-12-2013 14:00:00	101.600	1.09	42.535	1.023	1.06
20-12-2013 15:00:00	72.400	1.02	47.8	1.136	1.11
20-12-2013 16:00:00	58.460	0.94	52.375	1.225	1.13
20-12-2013 17:00:00	52.610	0.9	54.08	1.256	1.06

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
20-12-2013 18:00:00	49.750	0.88	50.8	1.196	1.1
20-12-2013 19:00:00	55.860	0.92	45.64	1.092	0.95
20-12-2013 20:00:00	68.800	1.01	41.185	0.993	0.93
20-12-2013 21:00:00	88.800	1.06	37.045	0.901	0.96
20-12-2013 22:00:00	76.000	1.03	32.995	0.811	1.02
20-12-2013 23:00:00	57.680	0.94	28.945	0.721	1.06
21-12-2013 00:00:00	40.520	0.8	25.6	0.64	1.05
21-12-2013 01:00:00	29.900	0.7	24	0.6	0.98
21-12-2013 02:00:00	18.950	0.58	23.3	0.58	0.9
21-12-2013 03:00:00	12.850	0.46	22.6	0.56	0.81
21-12-2013 04:00:00	8.050	0.34	21.9	0.54	0.71
21-12-2013 05:00:00	4.450	0.22	22.25	0.55	0.62
21-12-2013 06:00:00	3.200	0.16	23.65	0.59	0.52

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
21-12-2013 07:00:00	0.600	0.03	26.92	0.673	0.4
21-12-2013 08:00:00	2.400	0.12	30.88	0.764	0.32
21-12-2013 09:00:00	15.650	0.51	33.715	0.827	0.26
21-12-2013 10:00:00	26.300	0.66	35.425	0.865	0.4
21-12-2013 11:00:00	37.800	0.78	36.145	0.881	0.56
21-12-2013 12:00:00	50.270	0.88	36.685	0.893	0.68
21-12-2013 13:00:00	60.540	0.96	39.475	0.955	0.77
21-12-2013 14:00:00	64.830	0.99	42.805	1.029	0.88
21-12-2013 15:00:00	60.930	0.96	46.25	1.105	0.97
21-12-2013 16:00:00	49.490	0.87	49.25	1.165	1
21-12-2013 17:00:00	40.650	0.81	49.1	1.162	0.99
21-12-2013 18:00:00	36.000	0.76	45.775	1.095	0.93
21-12-2013 19:00:00	35.200	0.75	41.635	1.003	0.87

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
21-12-2013 20:00:00	36.300	0.76	37.99	0.922	0.83
21-12-2013 21:00:00	38.600	0.79	34.21	0.838	0.8
21-12-2013 22:00:00	37.900	0.78	30.475	0.755	0.8
21-12-2013 23:00:00	30.900	0.71	26.72	0.668	0.8
22-12-2013 00:00:00	21.100	0.61	24.4	0.61	0.8
22-12-2013 01:00:00	14.750	0.5	23.3	0.58	0.74
22-12-2013 02:00:00	9.280	0.38	22.25	0.55	0.67
22-12-2013 03:00:00	5.800	0.26	21.55	0.53	0.6
22-12-2013 04:00:00	4.120	0.2	20.5	0.5	0.51
22-12-2013 05:00:00	#N/A	-0.03	21.2	0.52	0.42
22-12-2013 06:00:00	0.800	0.04	22.25	0.55	0.32
22-12-2013 07:00:00	1.800	0.09	24	0.6	0.23
22-12-2013 08:00:00	3.400	0.17	27.2	0.68	0.16

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time (dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	สถานี S.5 ปริมาณการไหล (m^3/s)	สถานี S.5 ระดับน้ำ (m)	สถานี S.26 ปริมาณการไหล (m^3/s)	สถานี S.26 ระดับน้ำ (m)	สถานีนครหลวง ระดับน้ำ (m)
22-12-2013 09:00:00	4.600	0.22	30.88	0.764	0.16
22-12-2013 10:00:00	8.920	0.36	36.1	0.88	0.15
22-12-2013 11:00:00	14.400	0.49	40.87	0.986	0.29
22-12-2013 12:00:00	21.100	0.61	43.84	1.052	0.42
22-12-2013 13:00:00	32.800	0.73	45.1	1.08	0.54
22-12-2013 14:00:00	39.300	0.79	45.46	1.088	0.66
22-12-2013 15:00:00	39.400	0.79	45.325	1.085	0.77
22-12-2013 16:00:00	31.000	0.71	45.73	1.094	0.84
22-12-2013 17:00:00	23.200	0.63	46.65	1.113	0.85
22-12-2013 18:00:00	19.950	0.6	47.25	1.125	0.79
22-12-2013 19:00:00	21.800	0.62	45.235	1.083	0.74
22-12-2013 20:00:00	29.000	0.69	42.355	1.019	0.71
22-12-2013 21:00:00	39.000	0.79	39.07	0.946	0.71

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
22-12-2013 22:00:00	46.240	0.85	35.65	0.87	0.78
22-12-2013 23:00:00	48.970	0.87	32.005	0.789	0.85
23-12-2013 00:00:00	39.300	0.79	28.585	0.713	0.9
23-12-2013 01:00:00	27.600	0.68	23.86	0.596	0.92
23-12-2013 02:00:00	18.300	0.57	20.01	0.486	0.88
23-12-2013 03:00:00	12.250	0.45	15.95	0.365	0.81
23-12-2013 04:00:00	7.81	0.33	15.50	0.35	0.72
23-12-2013 05:00:00	4.36	0.21	15.20	0.34	0.62
23-12-2013 06:00:00	2.40	0.12	14.90	0.33	0.52
23-12-2013 07:00:00	0.80	0.04	14.90	0.33	0.40
23-12-2013 08:00:00	4.30	0.21	16.65	0.39	0.34
23-12-2013 09:00:00	9.34	0.38	17.70	0.42	0.27
23-12-2013 10:00:00	19.50	0.59	18.52	0.44	0.32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	**สถานี S.5**		**สถานี S.26**		**สถานีนครหลวง**
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	**ปริมาณการไหล (m^3/s)**	**ระดับน้ำ (m)**	**ปริมาณการไหล (m^3/s)**	**ระดับน้ำ (m)**	**ระดับน้ำ (m)**
23-12-2013 11:00:00	35.10	0.75	19.33	0.47	0.52
23-12-2013 12:00:00	49.88	0.88	20.15	0.49	0.62
23-12-2013 13:00:00	62.75	0.98	20.97	0.51	0.73
23-12-2013 14:00:00	82.40	1.04	22.67	0.56	0.84
23-12-2013 15:00:00	89.60	1.06	26.48	0.66	0.96
23-12-2013 16:00:00	66.40	1.00	31.06	0.77	1.02
23-12-2013 17:00:00	51.96	0.89	33.76	0.83	1.03
23-12-2013 18:00:00	42.60	0.82	32.23	0.79	0.98
23-12-2013 19:00:00	38.40	0.78	28.86	0.72	0.91
23-12-2013 20:00:00	37.60	0.78	25.80	0.65	0.86
23-12-2013 21:00:00	41.95	0.82	23.44	0.58	0.82
23-12-2013 22:00:00	48.45	0.87	21.80	0.54	0.81
23-12-2013 23:00:00	50.79	0.88	21.45	0.53	0.83

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
24-12-2013 00:00:00	48.71	0.87	21.76	0.54	0.86
24-12-2013 01:00:00	37.60	0.78	23.62	0.59	0.87
24-12-2013 02:00:00	26.90	0.67	24.36	0.61	0.85
24-12-2013 03:00:00	17.55	0.55	22.74	0.56	0.78
24-12-2013 04:00:00	11.85	0.44	21.55	0.53	0.70
24-12-2013 05:00:00	7.63	0.32	20.78	0.51	0.62
24-12-2013 06:00:00	5.83	0.26	19.31	0.47	0.52
24-12-2013 07:00:00	4.00	0.20	17.63	0.42	0.44
24-12-2013 08:00:00	3.80	0.19	16.31	0.38	0.35
24-12-2013 09:00:00	5.20	0.24	15.68	0.36	0.26
24-12-2013 10:00:00	12.30	0.45	15.26	0.34	0.18
24-12-2013 11:00:00	20.20	0.60	14.99	0.33	0.29
24-12-2013 12:00:00	31.50	0.72	14.78	0.33	0.45

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
24-12-2013 13:00:00	42.60	0.82	14.75	0.33	0.55
24-12-2013 14:00:00	53.39	0.90	15.71	0.36	0.65
24-12-2013 15:00:00	56.90	0.93	20.19	0.49	0.76
24-12-2013 16:00:00	50.92	0.88	25.56	0.64	0.84
24-12-2013 17:00:00	36.40	0.76	27.92	0.70	0.87
24-12-2013 18:00:00	28.00	0.68	26.24	0.66	0.84
24-12-2013 19:00:00	21.80	0.62	23.76	0.59	0.78
24-12-2013 20:00:00	18.60	0.57	21.66	0.53	0.71
24-12-2013 21:00:00	18.85	0.58	20.68	0.51	0.64
24-12-2013 22:00:00	23.60	0.64	19.28	0.47	0.61
24-12-2013 23:00:00	32.30	0.72	17.88	0.43	0.59
25-12-2013 00:00:00	37.20	0.77	16.70	0.39	0.64
25-12-2013 01:00:00	37.20	0.77	16.25	0.38	0.70

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
25-12-2013 02:00:00	27.50	0.68	18.96	0.46	0.75
25-12-2013 03:00:00	18.05	0.56	22.01	0.54	0.74
25-12-2013 04:00:00	12.45	0.45	21.17	0.52	0.67
25-12-2013 05:00:00	8.02	0.33	19.59	0.47	0.60
25-12-2013 06:00:00	4.00	0.20	18.33	0.44	0.51
25-12-2013 07:00:00	3.00	0.15	16.82	0.39	0.42
25-12-2013 08:00:00	3.60	0.18	15.62	0.35	0.33
25-12-2013 09:00:00	4.60	0.22	10.75	0.19	0.23
25-12-2013 10:00:00	9.07	0.37	10.20	0.17	0.16
25-12-2013 11:00:00	18.35	0.57	9.65	0.15	0.22
25-12-2013 12:00:00	28.10	0.68	9.23	0.13	0.39
25-12-2013 13:00:00	39.90	0.80	8.93	0.12	0.50
25-12-2013 14:00:00	53.52	0.90	10.60	0.18	0.62

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
25-12-2013 15:00:00	62.36	0.97	14.36	0.31	0.72
25-12-2013 16:00:00	63.53	0.98	19.73	0.48	0.84
25-12-2013 17:00:00	55.73	0.92	23.02	0.57	0.92
25-12-2013 18:00:00	44.16	0.83	24.56	0.61	0.93
25-12-2013 19:00:00	37.30	0.77	23.37	0.58	0.88
25-12-2013 20:00:00	33.10	0.73	20.71	0.51	0.82
25-12-2013 21:00:00	30.00	0.70	18.47	0.44	0.77
25-12-2013 22:00:00	30.30	0.70	16.88	0.40	0.73
25-12-2013 23:00:00	34.70	0.75	16.22	0.37	0.69
26-12-2013 00:00:00	38.80	0.79	14.96	0.33	0.68
26-12-2013 01:00:00	41.04	0.81	14.15	0.31	0.70
26-12-2013 02:00:00	37.80	0.78	14.27	0.31	0.75
26-12-2013 03:00:00	29.90	0.70	15.65	0.36	0.76

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
26-12-2013 04:00:00	21.80	0.62	16.58	0.39	0.74
26-12-2013 05:00:00	16.40	0.53	16.22	0.37	0.68
26-12-2013 06:00:00	11.70	0.43	14.99	0.33	0.62
26-12-2013 07:00:00	8.56	0.35	13.40	0.28	0.54
26-12-2013 08:00:00	6.73	0.29	11.72	0.22	0.46
26-12-2013 09:00:00	7.18	0.31	10.50	0.18	0.39
26-12-2013 10:00:00	15.45	0.51	9.18	0.13	0.34
26-12-2013 11:00:00	29.40	0.69	7.90	0.08	0.38
26-12-2013 12:00:00	41.95	0.82	7.18	0.05	0.55
26-12-2013 13:00:00	57.03	0.93	9.45	0.14	0.66
26-12-2013 14:00:00	70.40	1.01	14.66	0.32	0.75
26-12-2013 15:00:00	89.60	1.06	19.84	0.48	0.85
26-12-2013 16:00:00	84.00	1.05	23.62	0.59	0.96

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
26-12-2013 17:00:00	57.68	0.94	26.68	0.67	1.00
26-12-2013 18:00:00	41.95	0.82	27.24	0.68	0.98
26-12-2013 19:00:00	32.90	0.73	24.24	0.61	0.90
26-12-2013 20:00:00	23.90	0.64	21.20	0.52	0.82
26-12-2013 21:00:00	17.60	0.55	18.26	0.44	0.74
26-12-2013 22:00:00	13.95	0.48	16.64	0.39	0.66
26-12-2013 23:00:00	11.50	0.43	14.81	0.33	0.58
27-12-2013 00:00:00	10.65	0.41	12.56	0.25	0.51
27-12-2013 01:00:00	11.00	0.42	10.70	0.19	0.46
27-12-2013 02:00:00	11.35	0.43	9.40	0.14	0.44
27-12-2013 03:00:00	10.30	0.41	8.25	0.09	0.42
27-12-2013 04:00:00	8.71	0.36	7.33	0.05	0.42
27-12-2013 05:00:00	6.73	0.29	7.05	0.04	0.39

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
27-12-2013 06:00:00	5.20	0.24	6.25	0.01	0.35
27-12-2013 07:00:00	3.40	0.17	5.40	-0.03	0.30
27-12-2013 08:00:00	2.40	0.12	5.20	-0.04	0.25
27-12-2013 09:00:00	3.80	0.19	5.00	-0.05	0.20
27-12-2013 10:00:00	7.72	0.32	5.20	-0.04	0.18
27-12-2013 11:00:00	14.30	0.49	5.80	-0.01	0.21
27-12-2013 12:00:00	21.40	0.61	6.25	0.01	0.34
27-12-2013 13:00:00	32.90	0.73	6.95	0.04	0.46
27-12-2013 14:00:00	44.68	0.84	9.08	0.12	0.56
27-12-2013 15:00:00	54.04	0.91	12.14	0.24	0.66
27-12-2013 16:00:00	57.29	0.93	15.83	0.36	0.78
27-12-2013 17:00:00	52.87	0.90	20.82	0.51	0.85
27-12-2013 18:00:00	39.00	0.79	22.57	0.56	0.88

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
27-12-2013 19:00:00	28.40	0.68	22.25	0.55	0.84
27-12-2013 20:00:00	19.50	0.59	19.66	0.48	0.76
27-12-2013 21:00:00	14.80	0.50	16.94	0.40	0.69
27-12-2013 22:00:00	10.45	0.41	16.43	0.38	0.60
27-12-2013 23:00:00	8.17	0.34	15.11	0.34	0.52
28-12-2013 00:00:00	6.79	0.29	13.31	0.28	0.44
28-12-2013 01:00:00	6.79	0.29	11.90	0.23	0.38
28-12-2013 02:00:00	8.38	0.35	10.75	0.19	0.34
28-12-2013 03:00:00	11.75	0.44	10.28	0.17	0.32
28-12-2013 04:00:00	16.00	0.52	10.03	0.16	0.35
28-12-2013 05:00:00	18.40	0.57	8.45	0.10	0.44
28-12-2013 06:00:00	20.30	0.60	8.03	0.08	0.50
28-12-2013 07:00:00	23.90	0.64	9.23	0.13	0.55

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
28-12-2013 08:00:00	27.60	0.68	11.21	0.21	0.60
28-12-2013 09:00:00	34.40	0.74	12.32	0.24	0.65
28-12-2013 10:00:00	42.34	0.82	13.01	0.27	0.70
28-12-2013 11:00:00	53.52	0.90	14.00	0.30	0.75
28-12-2013 12:00:00	65.22	0.99	15.92	0.36	0.82
28-12-2013 13:00:00	95.60	1.07	19.70	0.48	0.90
28-12-2013 14:00:00	114.20	1.14	23.62	0.59	0.97
28-12-2013 15:00:00	123.20	1.19	27.40	0.69	1.04
28-12-2013 16:00:00	127.50	1.21	30.79	0.76	1.11
28-12-2013 17:00:00	118.80	1.16	33.09	0.81	1.15
28-12-2013 18:00:00	88.00	1.06	33.58	0.82	1.15
28-12-2013 19:00:00	58.07	0.94	31.47	0.78	1.09
28-12-2013 20:00:00	45.59	0.84	28.32	0.71	1.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
28-12-2013 21:00:00	34.90	0.75	24.84	0.62	0.91
28-12-2013 22:00:00	24.70	0.65	21.73	0.54	0.82
28-12-2013 23:00:00	17.50	0.55	18.86	0.45	0.74
29-12-2013 00:00:00	13.20	0.46	16.67	0.39	0.66
29-12-2013 01:00:00	9.97	0.40	14.72	0.32	0.58
29-12-2013 02:00:00	9.85	0.40	12.29	0.24	0.50
29-12-2013 03:00:00	13.20	0.46	10.43	0.18	0.45
29-12-2013 04:00:00	20.40	0.60	8.75	0.11	0.42
29-12-2013 05:00:00	31.50	0.72	7.53	0.06	0.50
29-12-2013 06:00:00	39.90	0.80	7.95	0.08	0.60
29-12-2013 07:00:00	49.49	0.87	11.78	0.23	0.69
29-12-2013 08:00:00	55.99	0.92	15.80	0.36	0.77
29-12-2013 09:00:00	62.88	0.98	19.49	0.47	0.85

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
29-12-2013 10:00:00	71.20	1.01	21.55	0.53	0.93
29-12-2013 11:00:00	89.20	1.06	23.16	0.58	0.97
29-12-2013 12:00:00	96.40	1.08	24.20	0.61	1.01
29-12-2013 13:00:00	109.40	1.12	25.44	0.64	1.04
29-12-2013 14:00:00	119.40	1.17	26.08	0.65	1.05
29-12-2013 15:00:00	128.10	1.21	27.12	0.68	1.08
29-12-2013 16:00:00	133.20	1.22	29.08	0.72	1.13
29-12-2013 17:00:00	125.20	1.20	31.78	0.78	1.16
29-12-2013 18:00:00	110.40	1.12	33.54	0.82	1.16
29-12-2013 19:00:00	72.40	1.02	32.68	0.80	1.16
29-12-2013 20:00:00	55.21	0.92	29.89	0.74	1.08
29-12-2013 21:00:00	41.17	0.81	26.60	0.67	1.00
29-12-2013 22:00:00	30.20	0.70	23.51	0.59	0.90

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	**สถานี S.5**		**สถานี S.26**		**สถานีนครหลวง**
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	**ปริมาณการไหล (m^3/s)**	**ระดับน้ำ (m)**	**ปริมาณการไหล (m^3/s)**	**ระดับน้ำ (m)**	**ระดับน้ำ (m)**
29-12-2013 23:00:00	19.40	0.59	20.68	0.51	0.82
30-12-2013 00:00:00	14.15	0.48	17.74	0.42	0.73
30-12-2013 01:00:00	9.34	0.38	16.49	0.38	0.64
30-12-2013 02:00:00	6.73	0.29	14.39	0.31	0.55
30-12-2013 03:00:00	5.89	0.26	11.96	0.23	0.46
30-12-2013 04:00:00	6.94	0.30	9.98	0.16	0.38
30-12-2013 05:00:00	16.30	0.53	8.28	0.09	0.34
30-12-2013 06:00:00	28.50	0.69	6.95	0.04	0.40
30-12-2013 07:00:00	38.80	0.79	6.88	0.04	0.56
30-12-2013 08:00:00	51.18	0.89	10.08	0.16	0.66
30-12-2013 09:00:00	61.97	0.97	14.81	0.33	0.75
30-12-2013 10:00:00	78.00	1.03	19.42	0.47	0.86
30-12-2013 11:00:00	98.00	1.08	22.81	0.57	0.96

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
30-12-2013 12:00:00	104.40	1.10	25.68	0.64	1.03
30-12-2013 13:00:00	109.00	1.12	27.92	0.70	1.08
30-12-2013 14:00:00	111.60	1.13	28.77	0.72	1.10
30-12-2013 15:00:00	115.40	1.15	28.23	0.71	1.10
30-12-2013 16:00:00	116.60	1.15	27.48	0.69	1.10
30-12-2013 17:00:00	111.40	1.13	27.28	0.68	1.10
30-12-2013 18:00:00	93.60	1.07	27.40	0.69	1.10
30-12-2013 19:00:00	62.75	0.98	27.08	0.68	1.09
30-12-2013 20:00:00	48.97	0.87	25.84	0.65	1.03
30-12-2013 21:00:00	36.10	0.76	23.65	0.59	0.96
30-12-2013 22:00:00	25.10	0.65	21.24	0.52	0.89
30-12-2013 23:00:00	17.05	0.54	18.61	0.45	0.81
31-12-2013 00:00:00	11.55	0.43	16.82	0.39	0.72

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
31-12-2013 01:00:00	7.78	0.33	15.11	0.34	0.64
31-12-2013 02:00:00	5.89	0.26	12.08	0.24	0.55
31-12-2013 03:00:00	4.30	0.21	9.93	0.16	0.46
31-12-2013 04:00:00	5.83	0.26	8.30	0.09	0.37
31-12-2013 05:00:00	7.93	0.33	6.00	0.00	0.30
31-12-2013 06:00:00	18.50	0.57	5.40	-0.03	0.26
31-12-2013 07:00:00	31.10	0.71	5.00	-0.05	0.42
31-12-2013 08:00:00	45.33	0.84	6.50	0.02	0.56
31-12-2013 09:00:00	60.02	0.95	11.18	0.21	0.66
31-12-2013 10:00:00	74.00	1.02	15.53	0.35	0.78
31-12-2013 11:00:00	89.60	1.06	20.96	0.51	0.90
31-12-2013 12:00:00	82.00	1.04	24.80	0.62	0.99
31-12-2013 13:00:00	83.60	1.04	27.04	0.68	1.03

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	สถานี S.5		สถานี S.26		สถานีนครหลวง
(dd-mm-yyyy hh:mm:ss)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ปริมาณการไหล (m^3/s)	ระดับน้ำ (m)	ระดับน้ำ (m)
31-12-2013 14:00:00	79.20	1.03	27.20	0.68	1.05
31-12-2013 15:00:00	75.60	1.02	25.76	0.64	1.04
31-12-2013 16:00:00	84.80	1.05	24.16	0.60	1.02
31-12-2013 17:00:00	98.80	1.08	22.99	0.57	1.00
31-12-2013 18:00:00	106.00	1.10	22.74	0.56	1.00
31-12-2013 19:00:00	95.20	1.07	24.00	0.60	1.02
31-12-2013 20:00:00	64.96	0.99	26.28	0.66	1.05
31-12-2013 21:00:00	49.88	0.88	26.76	0.67	1.04
31-12-2013 22:00:00	36.20	0.76	24.64	0.62	0.97
31-12-2013 23:00:00	24.90	0.65	21.87	0.54	0.89

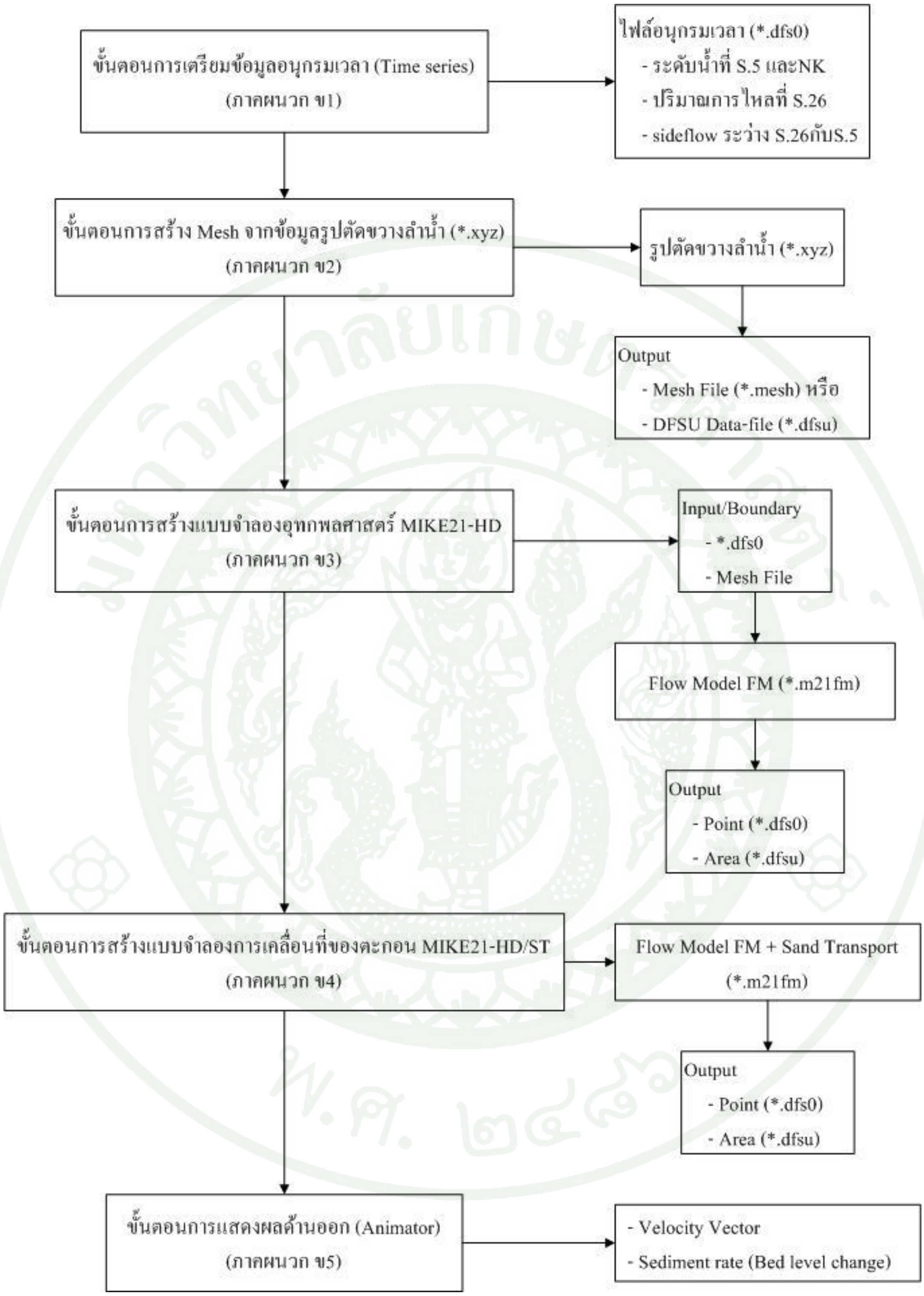
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลอนุกรมเวลา สำหรับการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน

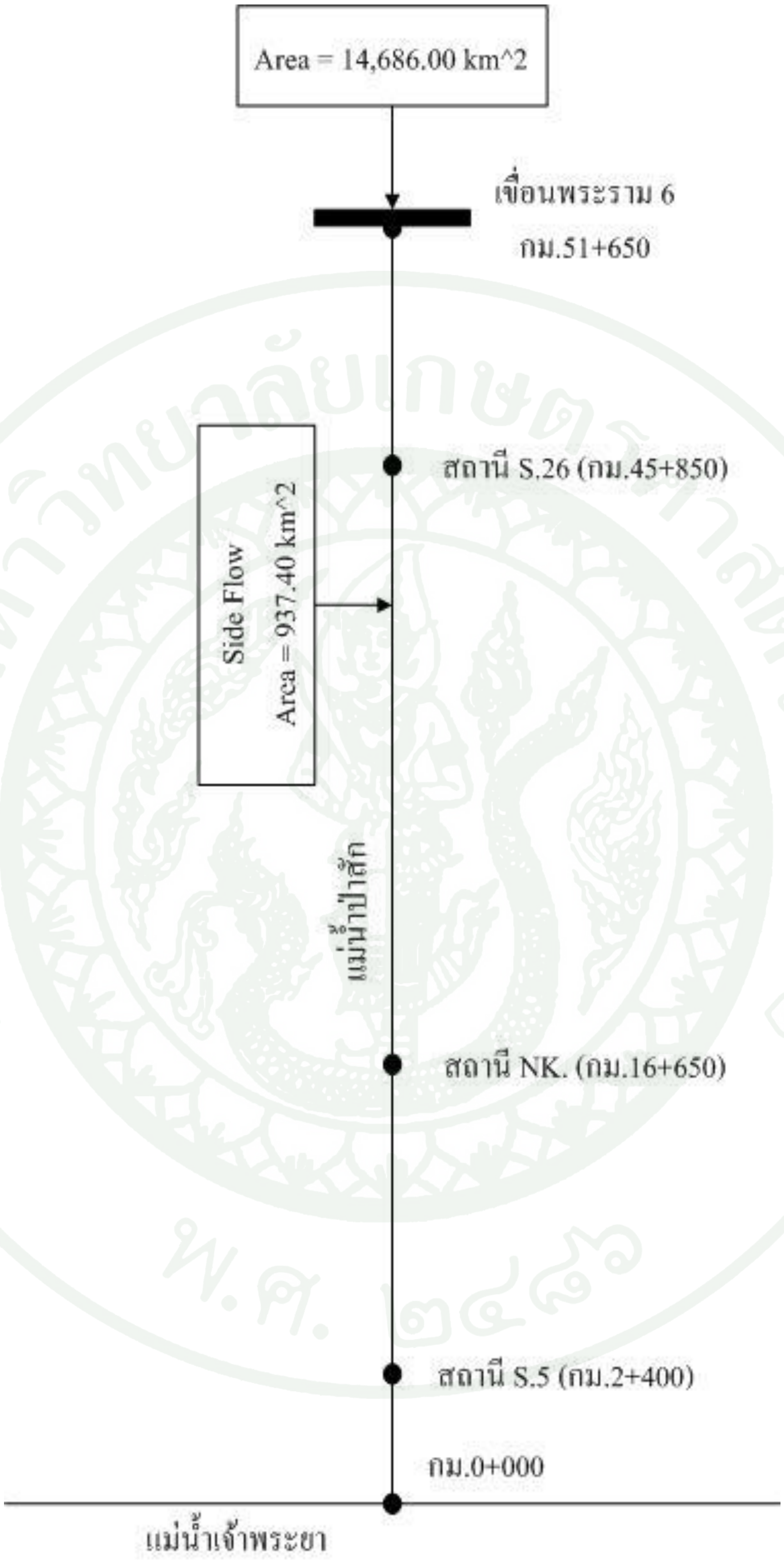
MIKE21-HD/ST

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ข1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลอนุกรมเวลา สำหรับการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน MIKE21-HD/ST

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ข2 ระบบแม่น้ำป่าสักที่ใช้จำลองโดย MIKE21

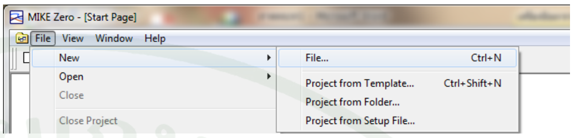
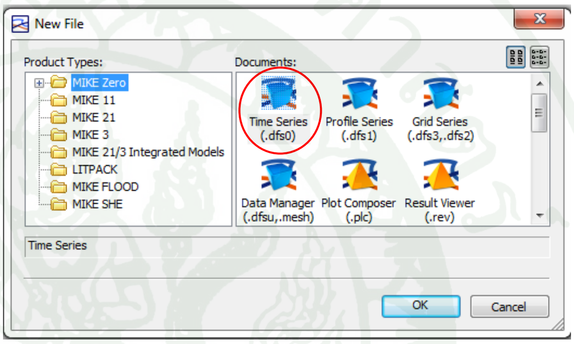
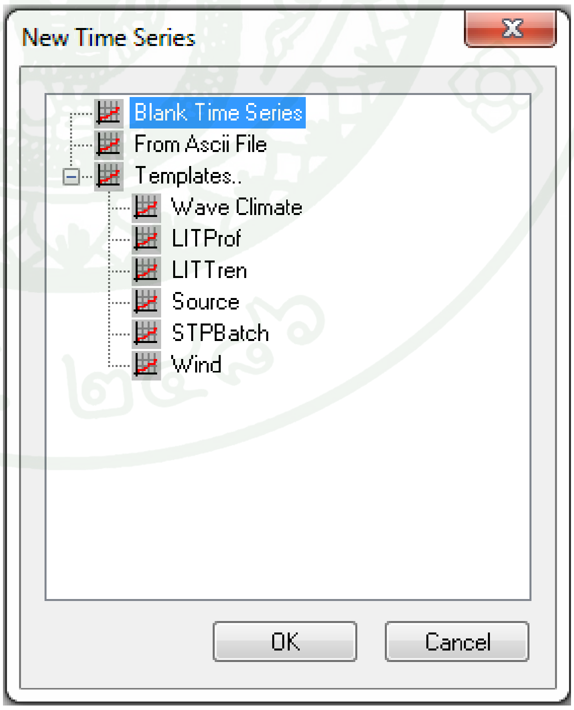
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลอนุกรมเวลา (Time series)

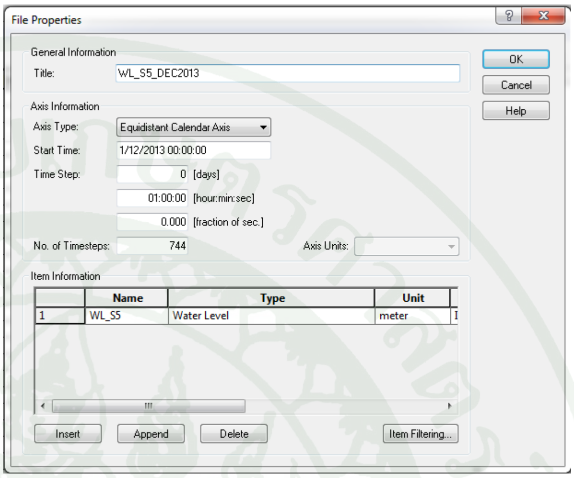
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลระดับน้ำ

ขั้นตอน	โปรแกรม
1. เปิดโปรแกรม MIKE Zero แล้วกดที่ File>New หรือ Ctrl-N หรือ	
2. เลือก MIKE Zero แล้วเลือก Time Series จากนั้นจึงกด OK	
3. เลือกแบบ Time Series ที่จะสร้างเป็น Blank Time Series จากนั้นจึงกด OK	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
4. จากนั้นให้กำหนด File Properties ของข้อมูลที่เราต้องการ เสร็จแล้วจึงกด OK	

General Information

- Title = WL_S5_DEC2013

Axis Information

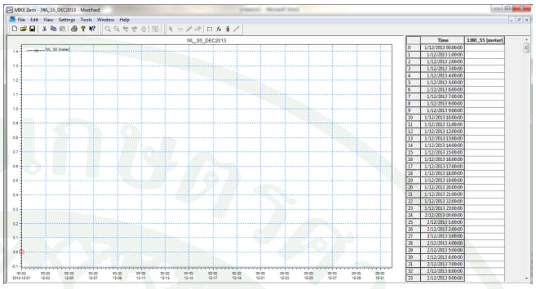
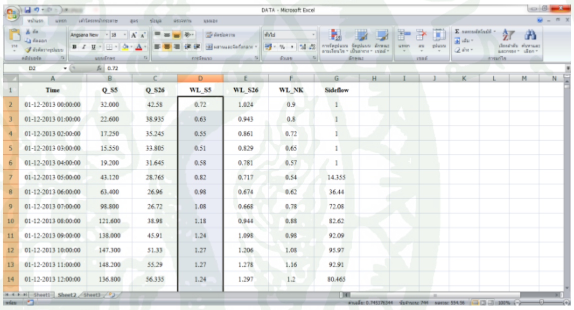
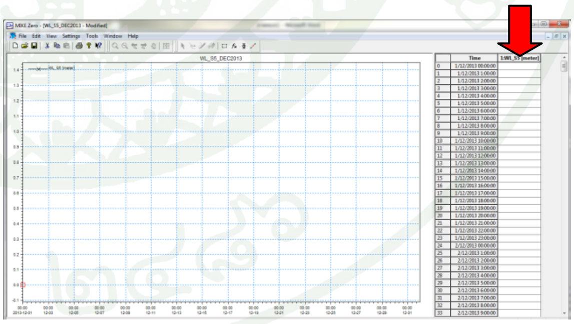
- Axis Type = Equidistant Calender Axis
- Stat Time = 1/12/2013 00:00:00
- Time Step = 01:00:00 [hour:min:sec]
- No. of Timesteps = 744

Item Information

- Name = WL_S5
- Type = Water Level

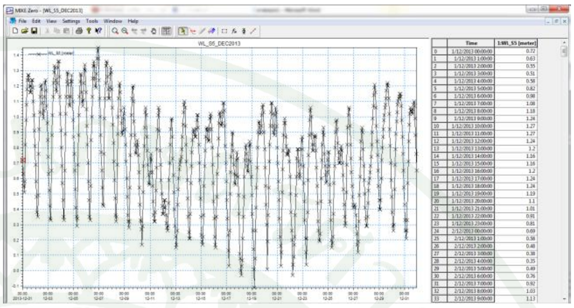
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
5. เมื่อเสร็จแล้วจะได้ Blank Time Series Data ดังรูป	
6. เลือกข้อมูลที่ต้องการ คือ ข้อมูลระดับน้ำของสถานี S.5 และทำการคัดลอก (Ctrl-C)	
7. นำ Mouse ไปชี้ไว้ที่ช่องบนสุดของช่องใส่ข้อมูล แล้วกดวาง (Ctrl-V)	

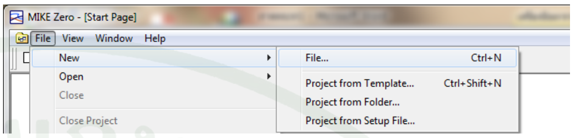
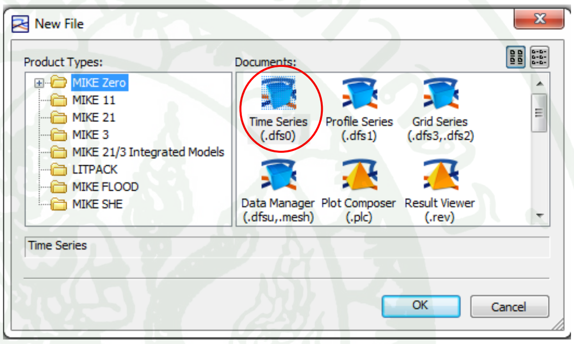
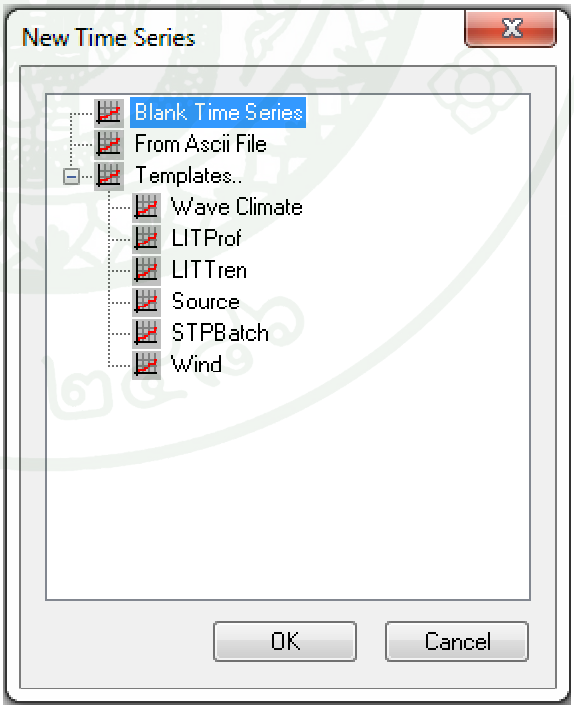
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
8. จะได้ Time Series Data File สำหรับข้อมูลระดับน้ำของสถานี S.5 ดังรูป - ทำการ Save ไฟล์นี้ไว้ โดยกด File>Save หรือ Ctrl-S หรือ * ไฟล์นี้จะนำไปใช้ในการ Setup แบบจำลอง MIKE21 ต่อไป	

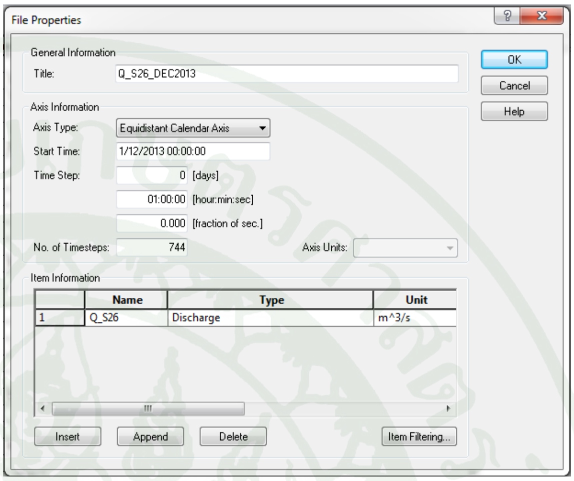
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค2 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลปริมาณการไหล

<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>โปรแกรม</th></tr>
<tr><td>1. เปิดโปรแกรม MIKE Zero แล้วกด ที่ File>New หรือ Ctrl-N หรือ </td><td>
</td></tr>
<tr><td>2. เลือก MIKE Zero แล้วเลือก Time Series จากนั้นจึงกด OK</td><td>
</td></tr>
<tr><td>3. เลือกแบบ Time Series ที่จะสร้าง เป็น Blank Time Series จากนั้น จึงกด OK</td><td>
</td></tr>
</table>

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
4. จากนั้นให้กำหนด File Properties ของข้อมูลที่เราต้องการ เสร็จแล้วจึงกด OK	

General Information

- Title = Q_S26_DEC2013

Axis Information

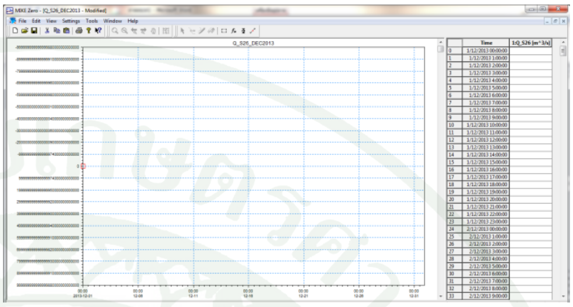
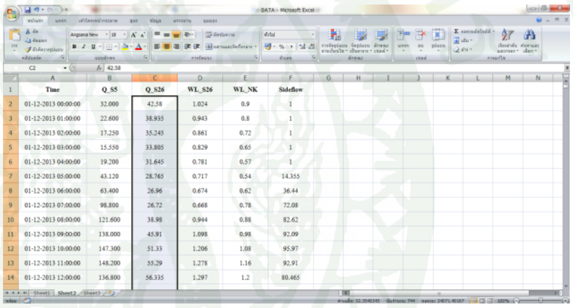
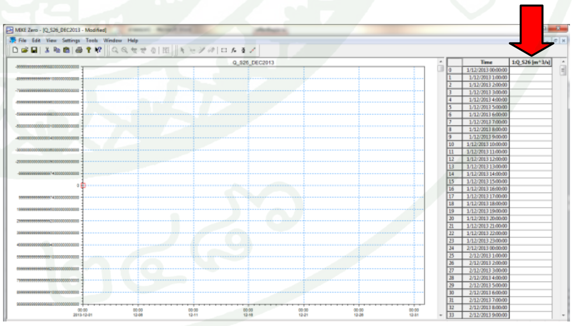
- Axis Type = Equidistant Calender Axis
- Stat Time = 1/12/2013 00:00:00
- Time Step = 01:00:00 [hour:min:sec]
- No. of Timesteps = 744

Item Information

- Name = Q_S26
- Type = Discharge

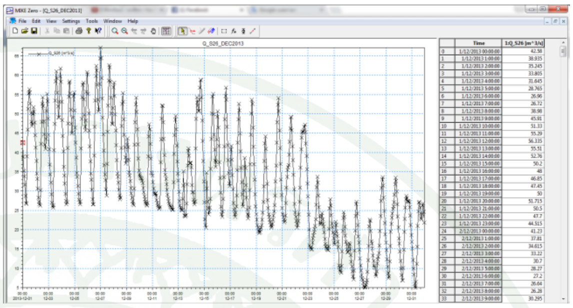
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
5. เมื่อเสร็จแล้วจะได้ Blank Time Series Data ดังรูป	
6. เลือกข้อมูลที่ต้องการ คือ ข้อมูลปริมาณการไหลของสถานี S.26 และทำการคัดลอก (Ctrl-C)	
7. นำ Mouse ไปชี้ไว้ที่ช่องบนสุดของช่องใส่ข้อมูล แล้วกดวาง (Ctrl-V)	

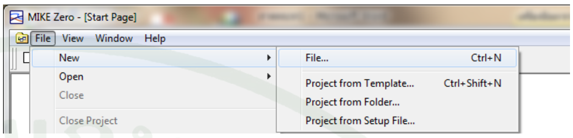
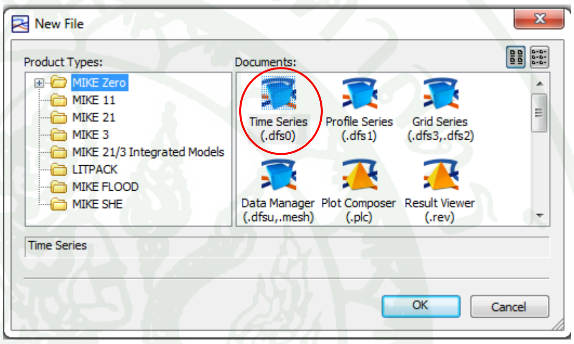
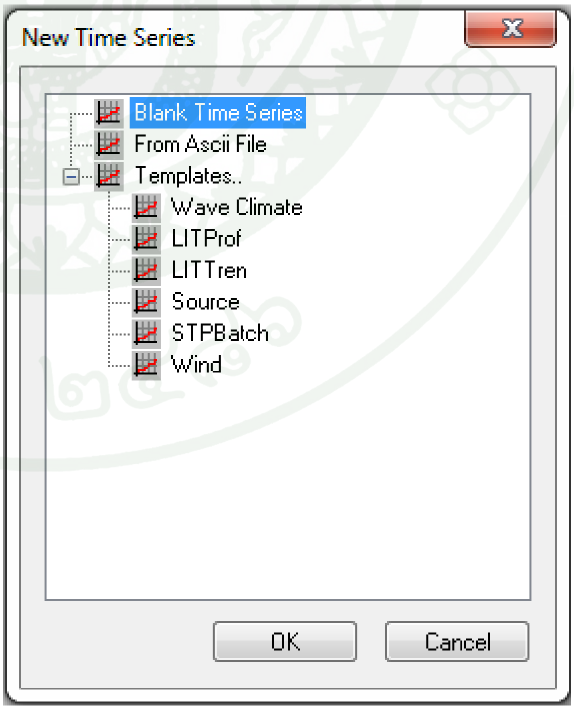
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
8. จะได้ Time Series Data File สำหรับข้อมูลปริมาณการไหลของสถานี S.26 ดังรูป - ทำการ Save ไฟล์นี้ไว้ โดยกด File>Save หรือ Ctrl-S หรือ * ไฟล์นี้จะนำไปใช้ในการ Setup แบบจำลอง MIKE21 ต่อไป	

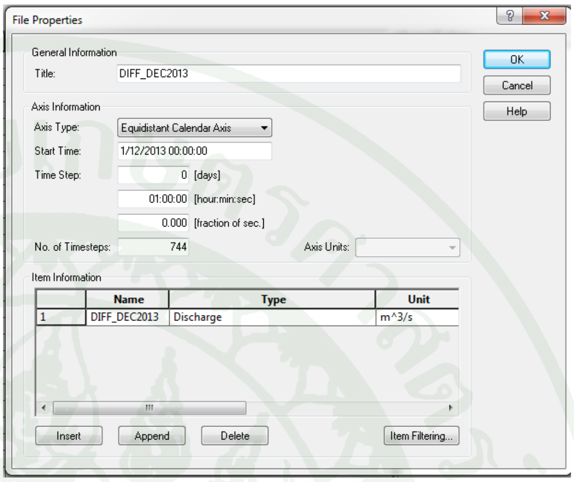
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค3 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (Sideflow)

ขั้นตอน	โปรแกรม
1. เปิดโปรแกรม MIKE Zero แล้วกดที่ File>New หรือ Ctrl-N หรือ	
2. เลือก MIKE Zero แล้วเลือก Time Series จากนั้นจึงกด OK	
3. เลือกแบบ Time Series ที่จะสร้างเป็น Blank Time Series จากนั้นจึงกด OK	

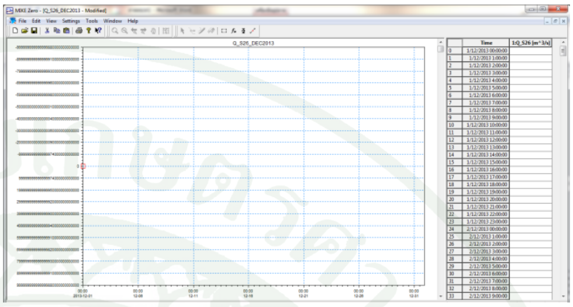
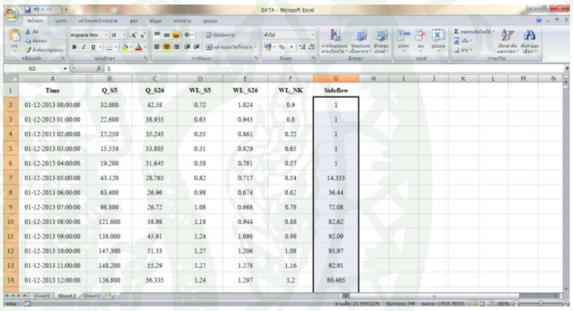
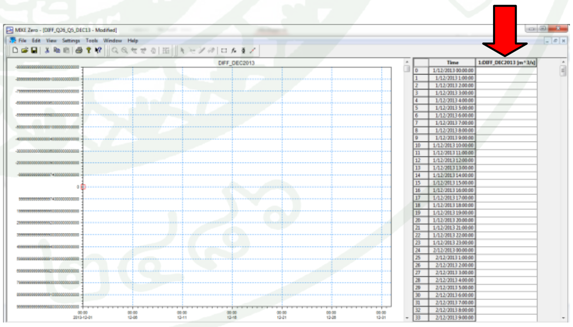
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
4. จากนั้นให้กำหนด File Properties ของข้อมูลที่เราต้องการ เสร็จแล้วจึงกด OK	 **General Information** - Title = DIFF_DEC2013 **Axis Information** - Axis Type = Equidistant Calender Axis - Stat Time = 1/12/2013 00:00:00 - Time Step = 01:00:00 [hour:min:sec] - No. of Timesteps = 744 **Item Information** - Name = DIFF_DEC2013 - Type = Discharge

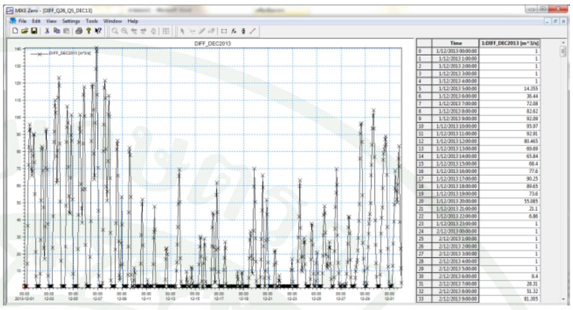
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
5. เมื่อเสร็จแล้วจะได้ Blank Time Series Data ดังรูป	
6. เลือกข้อมูลที่ต้องการ คือ ข้อมูลปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (Sideflow) และทำการคัดลอก (Ctrl-C)	
7. นำ Mouse ไปชี้ไว้ที่ช่องบนสุดของช่องใส่ข้อมูล แล้วกดวาง (Ctrl-V)	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
8. จะได้ Time Series Data File สำหรับข้อมูลปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง ดังรูป - ทำการ Save ไฟล์นี้ไว้ โดยกด File>Save หรือ Ctrl-S หรือ * ไฟล์นี้จะนำไปใช้ในการ Setup แบบจำลอง MIKE21 ต่อไป	

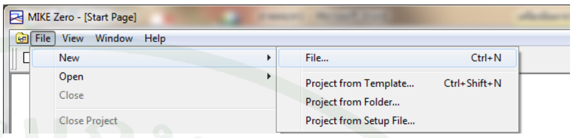
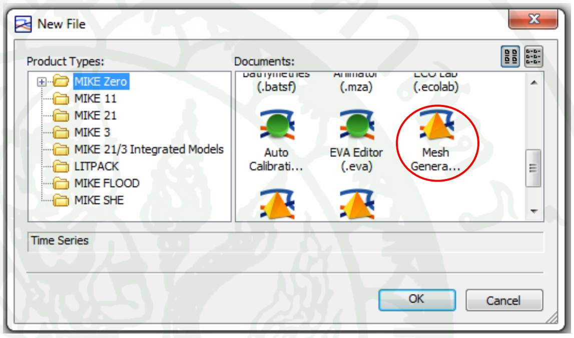
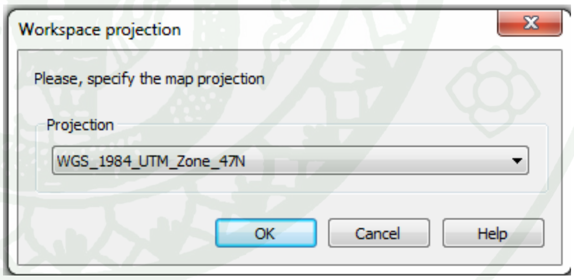
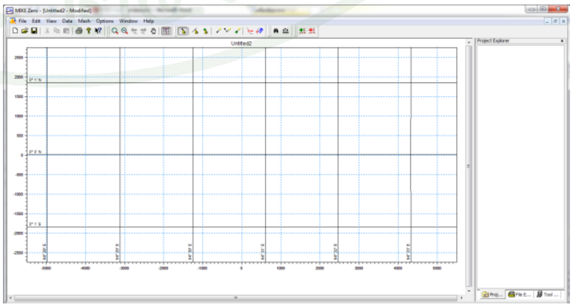
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

ขั้นตอนการสร้าง Mesh จากข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำ

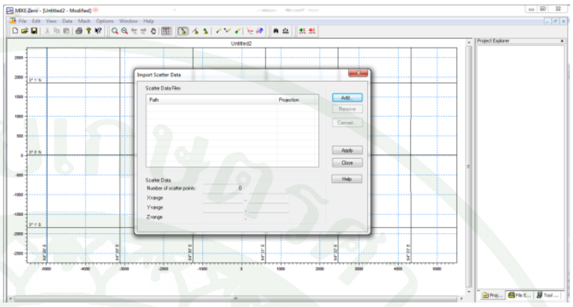
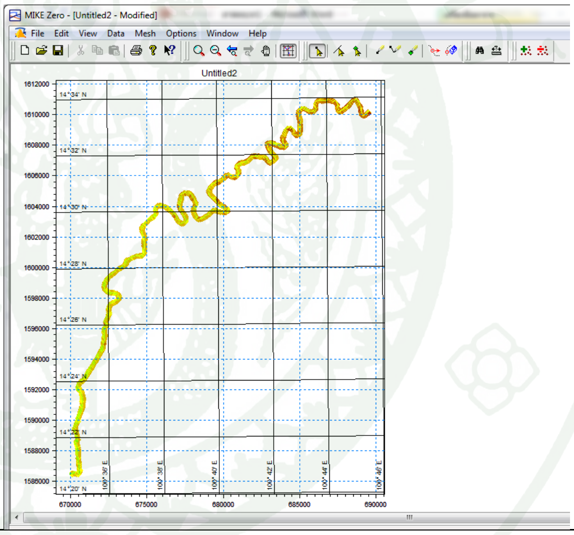
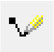
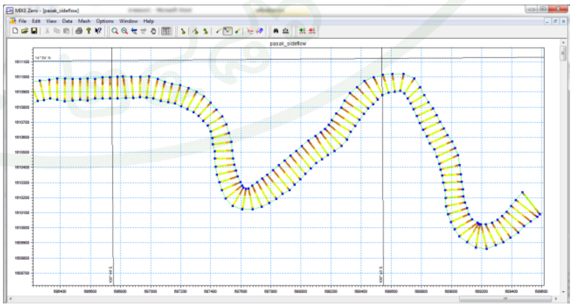
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 ขั้นตอนการสร้าง Mesh จากข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำ

<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>โปรแกรม</th></tr>
<tr><td>1. เปิดโปรแกรม MIKE Zero
แล้วกดที่ File>New หรือ Ctrl-N
หรือ </td><td>
</td></tr>
<tr><td>2. เลือก MIKE Zero แล้วเลือก
Mesh Generator จากนั้น
จึงกด OK</td><td>
</td></tr>
<tr><td>3. จากนั้นให้กำหนด Projection
เป็น WGS_1984_UTM_Zone_47N
จากนั้นกด OK</td><td>
</td></tr>
<tr><td>4. เมื่อเสร็จแล้วจะได้ดังรูป</td><td></td></tr>
</table>

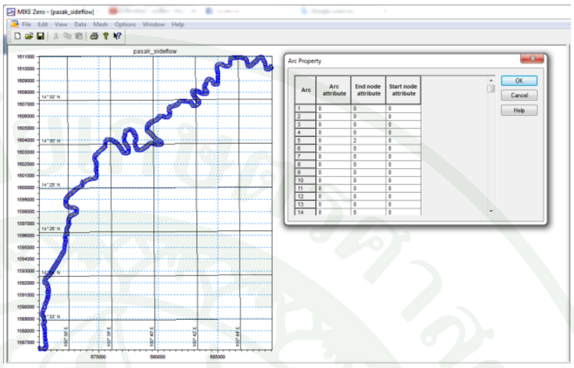
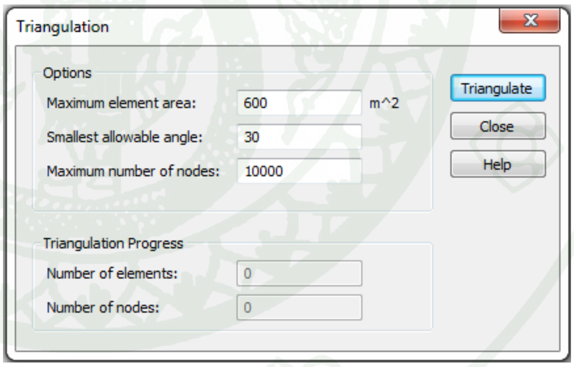
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
5. นำเข้าข้อมูล ไปที่ Data>Import Scatter Data จะได้ดังรูป	
6. จากนั้นกด Add แล้วเลือกข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำ แล้วกด Apply จะได้ดังรูป	
7. ทำการใส่ Nodes โดยใช้ เมื่อทำการใส่ Nodes ตลอดลำน้ำแล้ว ก็ทำการลากเชื่อมระหว่าง Nodes โดยใช้ 	

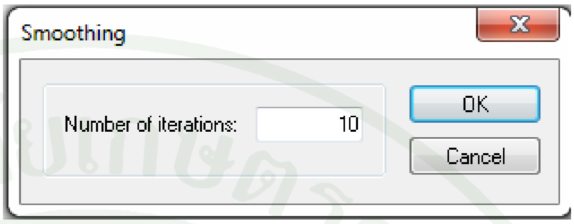
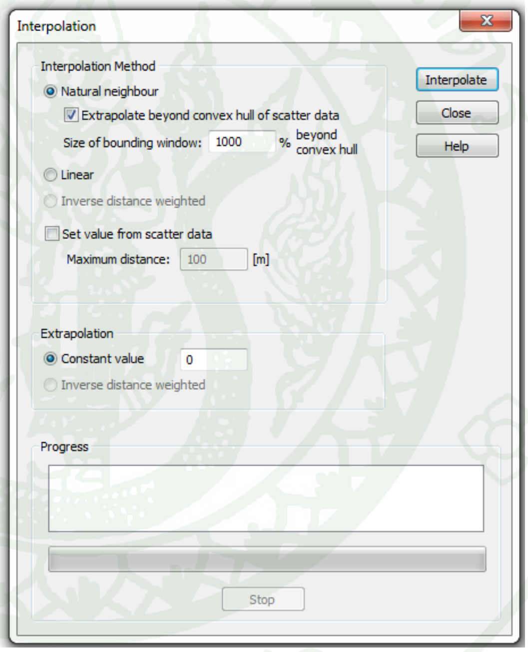
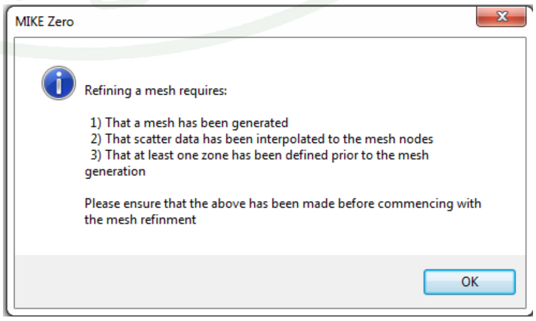
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
8. กำหนดเส้นเชื่อมระหว่าง Nodes โดยกำหนดให้ - ด้านเหนือน้ำ(Inflow) ใช้เลข 2 - ด้านท้ายน้ำ (Outflow) ใช้เลข 3 - การไหลด้านข้าง (Sideflow) ใช้เลข 4 - แนวขอบตลิ่ง เป็นเลข 0 โดยไปที่ Edit>Select All แล้วคลิกขวาเลือก Properties แล้วทำการกำหนด Arc Property ตามที่กำหนดไว้ข้างต้น	
9. ไปที่ Mesh>Triangulation แล้วกำหนดขนาดตามที่ต้องการ แล้วกด Triangulate	 **Options** - Maximum element area = 600 m^2 - Smallest allowable angle = 30 - Maximum number of nodes = 10000

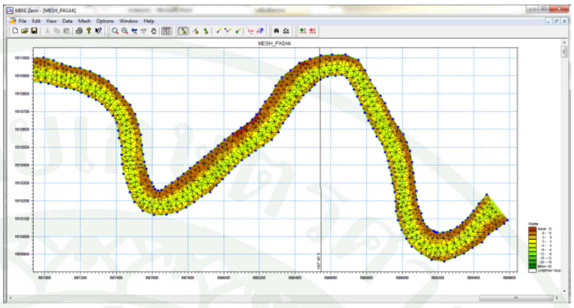
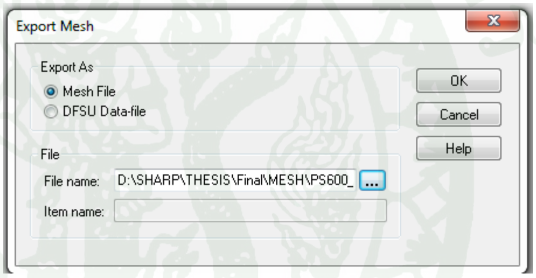
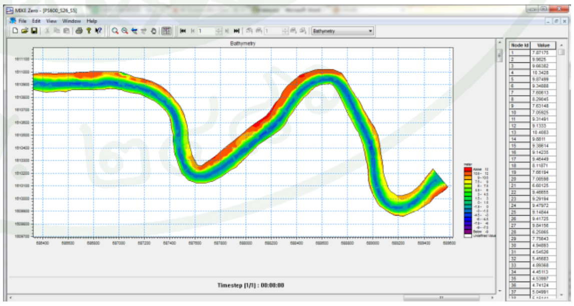
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>โปรแกรม</th></tr>
<tr><td>10. ไปที่ Mesh>Smoothing Mesh
แล้วกำหนด Number of iterations =
10 แล้วกด OK</td><td>
</td></tr>
<tr><td>11. ไปที่ Mesh>Interpolate
ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น
แล้วกด Interpolate > Close</td><td>
</td></tr>
<tr><td>12. ไปที่ Mesh>Refine Mesh
ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น
แล้วกด OK</td><td>
</td></tr>
</table>

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

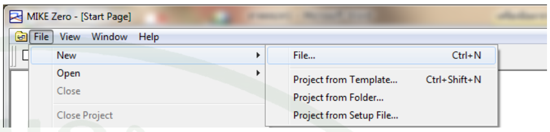
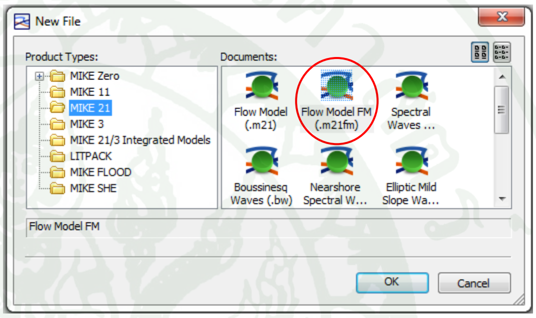
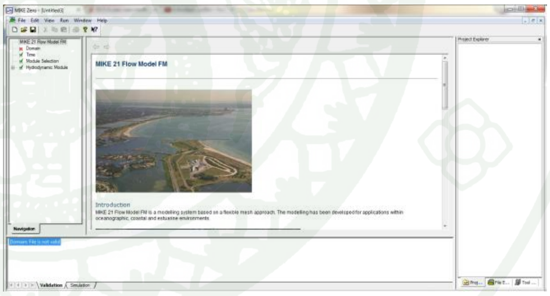
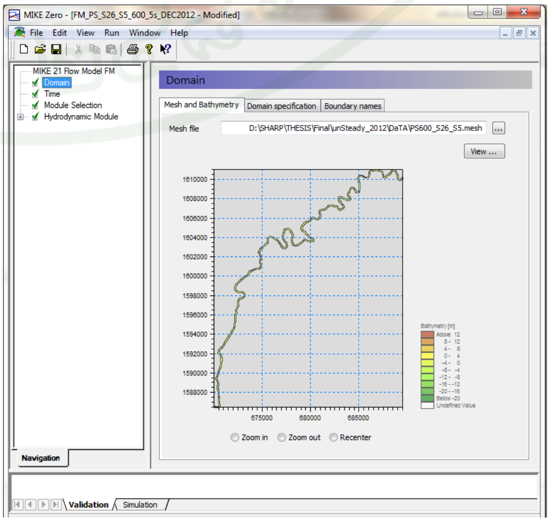
ขั้นตอน	โปรแกรม
13. เมื่อทำตามขั้นตอนข้างต้น จะได้ Mesh และElement ดังรูป	
14. ไปที่ Mesh>Export Mesh ตั้งชื่อไฟล์ แล้วกด OK	 **File** - File name: = PS600_S26_S5.mash
15. เมื่อทำการ Export Mesh ออกมา จะได้ไฟล์ออกมาหนึ่งไฟล์คือ PS600_S26_S5.Mesh และเมื่อเปิดไฟล์ดังกล่าว จะได้ดังรูป * ไฟล์นี้จะนำไปใช้ในการ Setup แบบจำลอง MIKE21 ต่อไป	

ภาคผนวก จ

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE21-HD

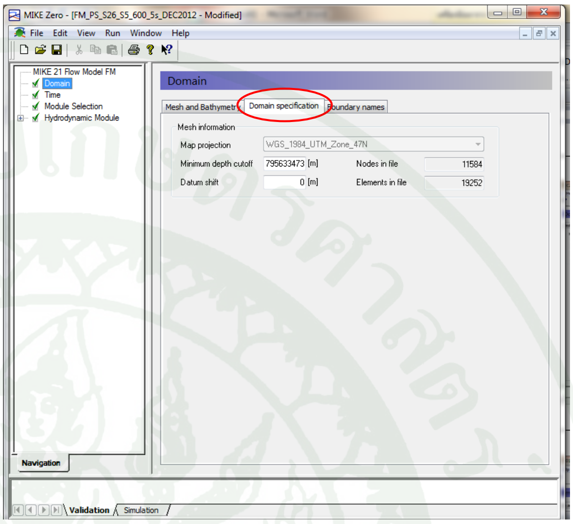
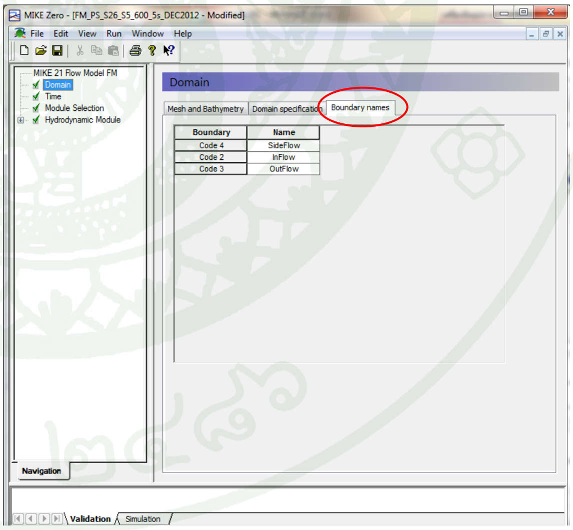
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE21-HD

ขั้นตอน	โปรแกรม
1. เปิดโปรแกรม MIKE Zero แล้วกดที่ File>New หรือ Ctrl-N หรือ 🗋	
2. เลือก MIKE21 แล้วเลือก FLOW Model FM จากนั้นจึงกด OK	
3. จากนั้น MIKE21 FLOW Model FM จะปรากฏขึ้นมาให้พร้อมใช้งาน	
4. เลือก Domain แล้วนำเข้าไฟล์ข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำ ที่ได้เตรียมไว้ จะได้ดังรูป	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

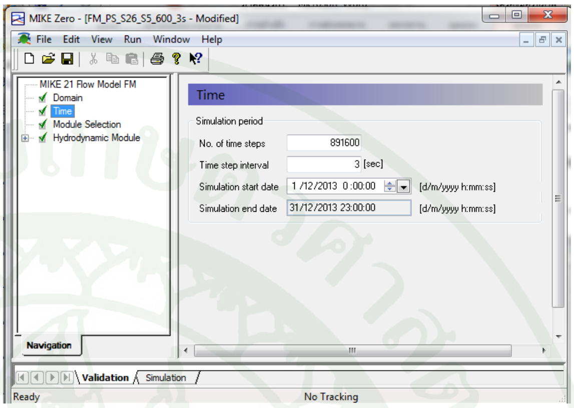
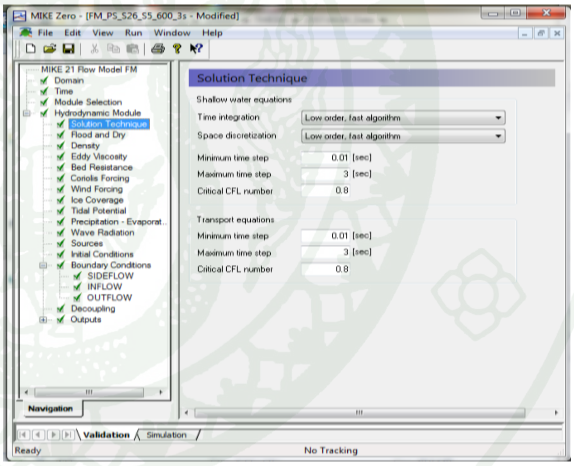
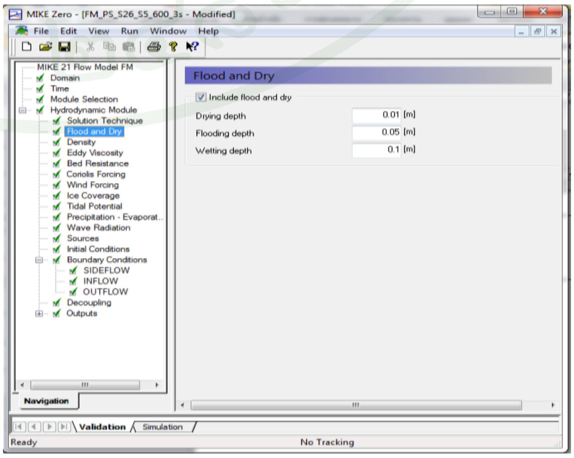
ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
5. เลือก Domain specification ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น	
6. เลือก Boundary names แล้วทำการตั้งชื่อ Boundary	

Boundary	Name
Code 4	SIDEFLOW
Code 2	INFLOW
Code 3	OUTFLOW

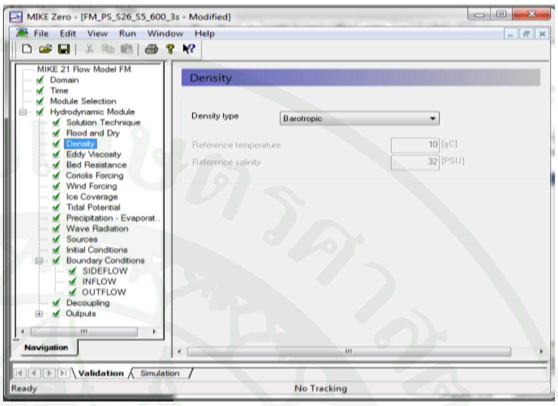
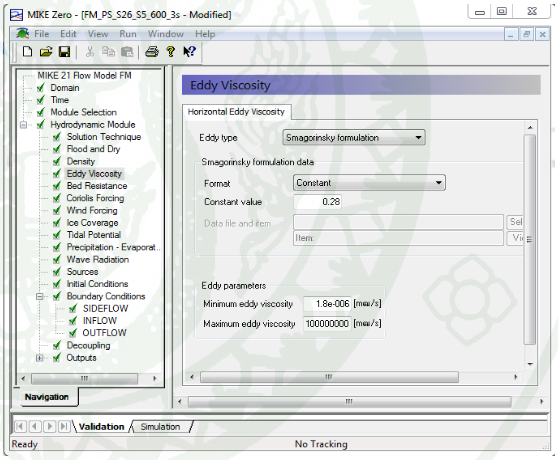
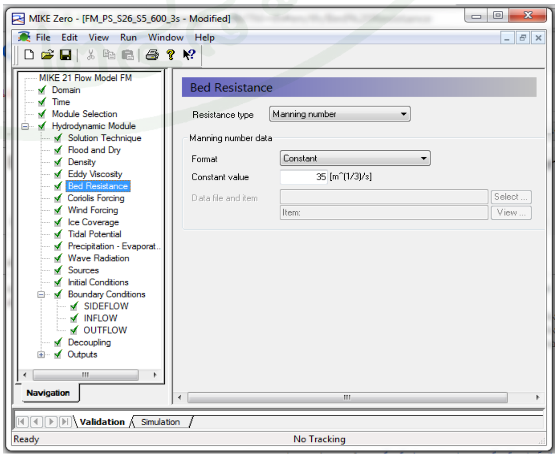
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
7. คลิกที่ Time จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ แล้วระบุจำนวน time step, overall time step และ simulation start date แสดงดังภาพ	
8. คลิก Solution Technique จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ แล้วระบุจำนวน Minimum time step, Maximum time step และ Critical CFL number แสงดังภาพ *การระบุในขั้นตอนนี้ควรระบุให้สอดคล้องกับขั้นตอนที่ 7	
9. คลิก Flood and Dry จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ จากนั้นระบุจำนวนลงในช่องว่าง ดังภาพ	

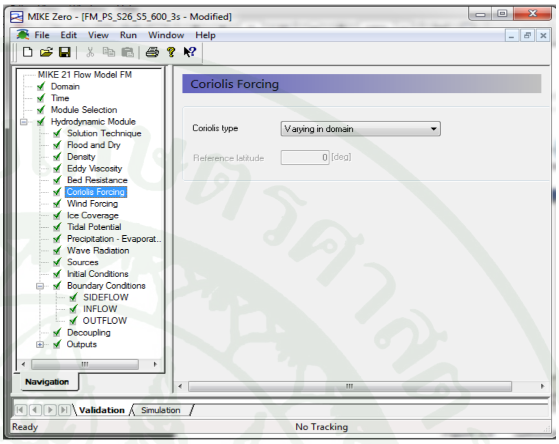
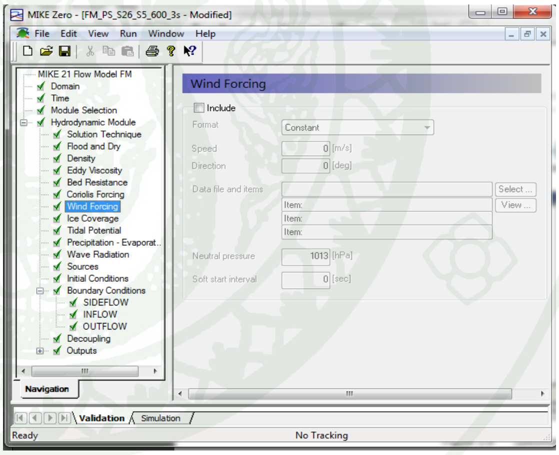
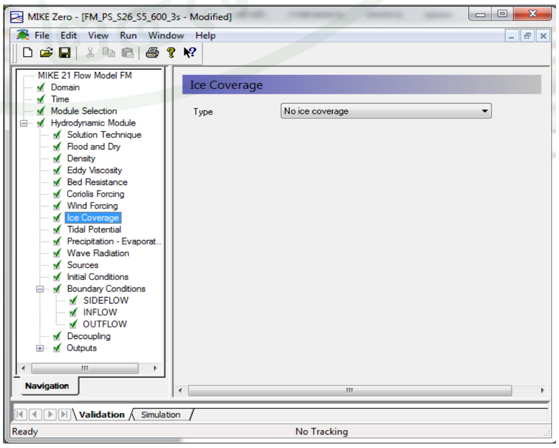
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
10. คลิก Density จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ และเลือก Density type เป็นแบบ Barotropic	
11. คลิก Density จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ เป็นการกำหนดค่าความหนืด ซึ่งในครั้งนี้ ได้กำหนดให้เป็นค่าคงที่	
12. คลิก Bed Resistance จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ เป็นการกำหนดค่าความต้านทานท้องน้ำ ซึ่งในครั้งนี้ ได้กำหนดให้เป็นค่าคงที่	

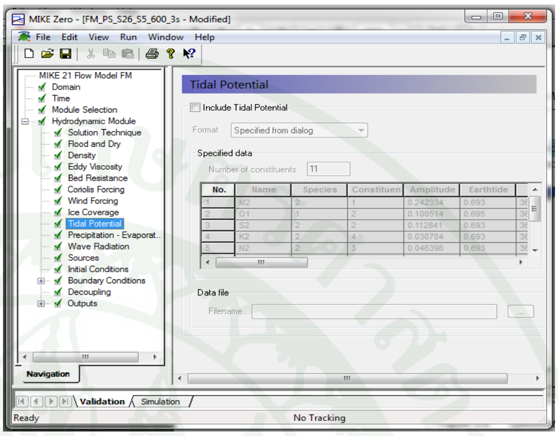
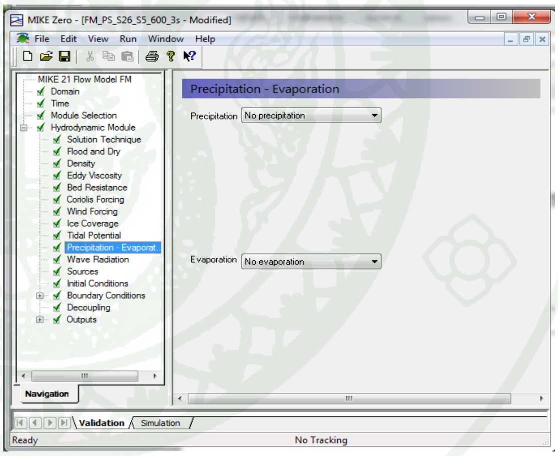
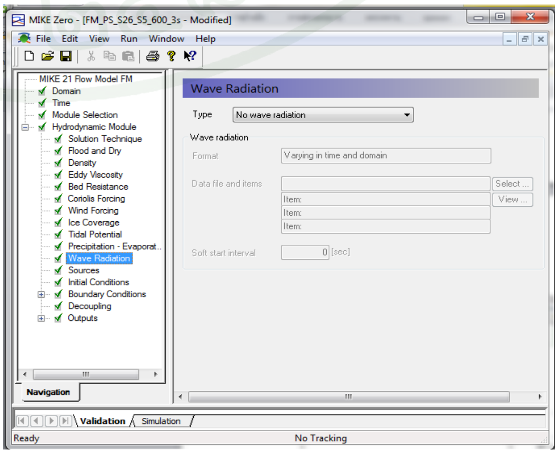
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
13. คลิก Coriolis Forcing จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น (ใช้ตาม Default)	
14. คลิก Wind Forcing จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น (ใช้ตาม Default)	
15. คลิก Ice Coverage จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น (ใช้ตาม Default)	

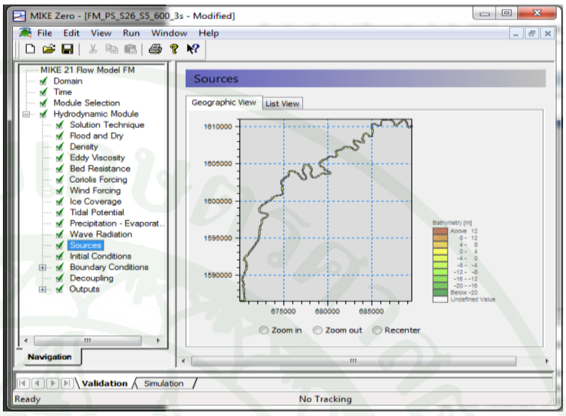
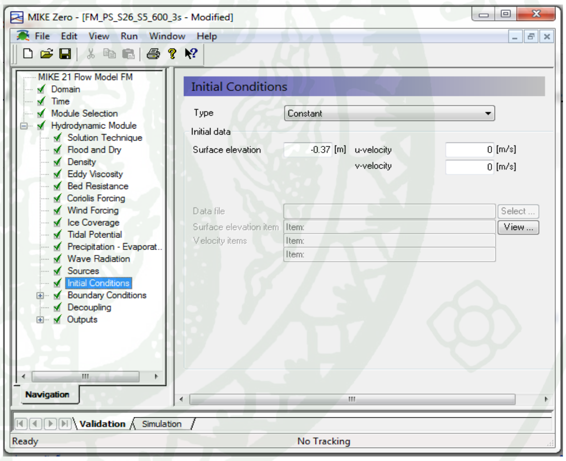
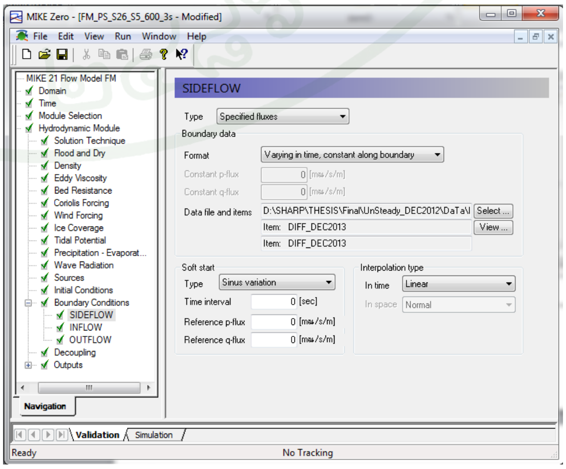
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
16. คลิก Tidal Potential จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น (ใช้ตาม Default)	
17. คลิก Precipitation – Evaporation จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น (ใช้ตาม Default)	
18. คลิก Wave Radiation จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น (ใช้ตาม Default)	

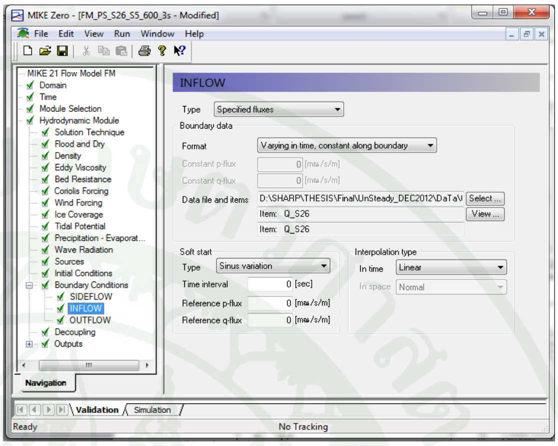
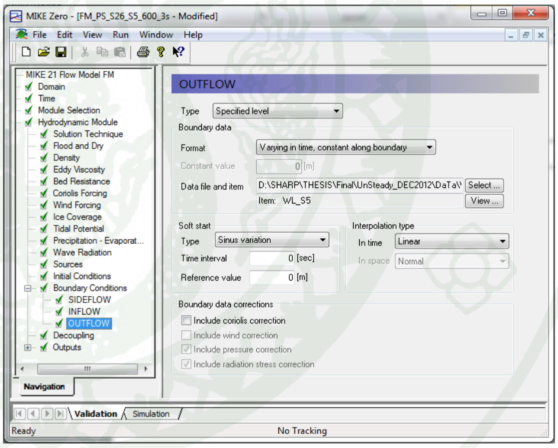
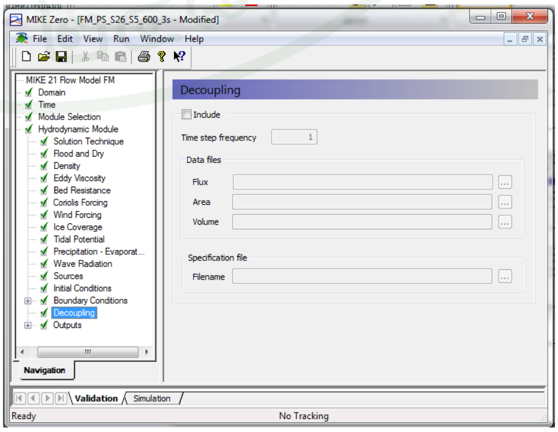
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
19. คลิก Sources จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น (ใช้ตาม Default)	
20. คลิก Initial Conditions จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ เป็นการกำหนดค่าระดับความสูงของผิวน้ำ (Surface elevation)	
21. คลิก Boundary Conditions แล้วเลือก SIDEFLOW จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ และกำหนดค่าต่างๆ ดังภาพ ส่วน Data file and items ให้ทำการนำเข้าไฟล์ข้อมูลปริมาณการไหลเข้าด้านข้างที่เตรียมไว้	

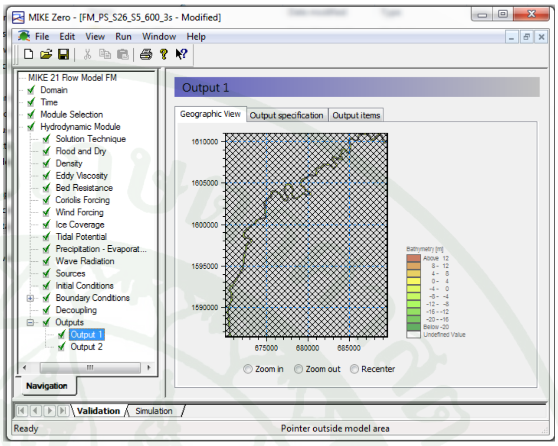
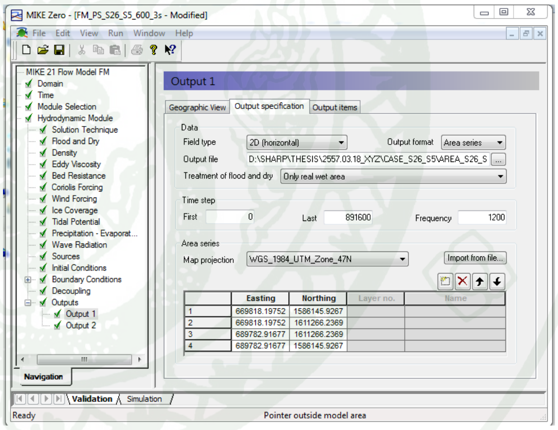
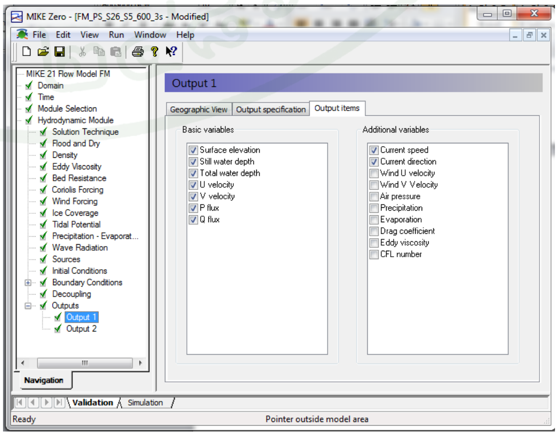
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
22. คลิก Boundary Conditions แล้วเลือก INFLOW จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ และกำหนดค่าต่างๆดังภาพ ส่วน Data file and items ให้ทำการนำเข้าไฟล์ข้อมูลปริมาณการไหลที่เตรียมไว้	
23. คลิก Boundary Conditions แล้วเลือก OUTDEFLOW จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ และกำหนดค่าต่างๆดังภาพ ส่วน Data file and items ให้ทำการนำเข้าไฟล์ข้อมูลปริมาณระดับน้ำที่เตรียมไว้	
24. คลิก Initial Conditions จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ เป็นการกำหนดค่าระดับความสูงของผิวน้ำ (Surface elevation)	

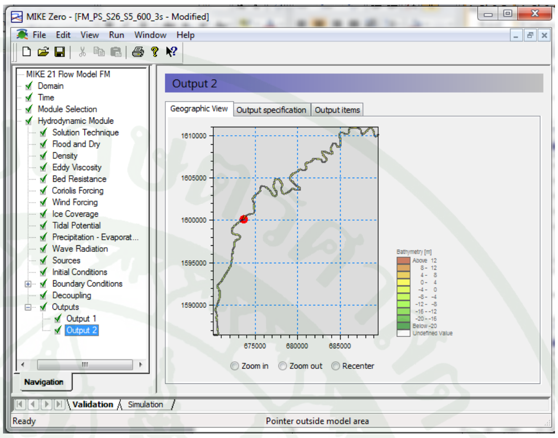
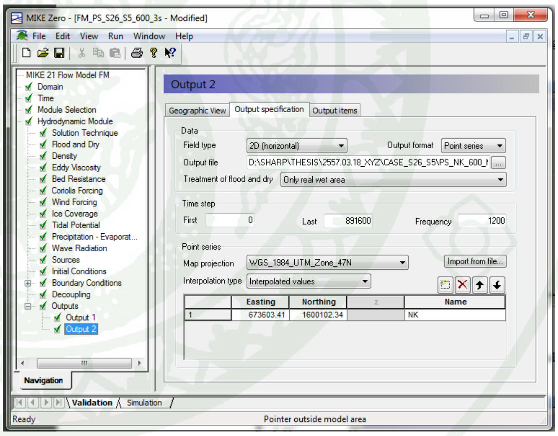
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
25. คลิก Outputs แล้วเลือก Output 1 จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ	
26. เลือก Output specification แล้ว เลือก Output format เป็นแบบ Area series และทำการบันทึก Output file โดยตั้งชื่อไฟล์ Output file เป็น AREA_S26_S5_600_5min_HD_750	
27. เลือก Output items แล้วเลือก ข้อมูลนำออกตามที่ต้องการ	

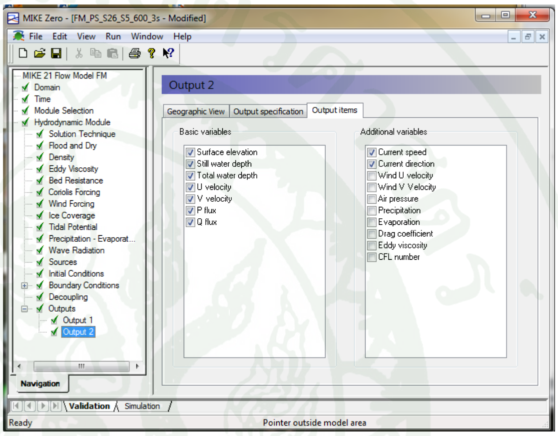
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
28. คลิก Outputs แล้วเลือก Output 2 จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ	
29. เลือก Output specification แล้วกำหนดข้อมูล และทำการบันทึก Output file ซึ่งเป็นตำแหน่งของสถานี NK ที่ใช้ในการปรับเทียบแบบจำลองฯ	 **Data** - Output format = Point series - Output file = PS_S26_S5_600_5min_HD_750 **Point series** - Map projection = WGS_1984_UTM_Zone_47N - Interpolation type = Interpolated values - พิกัด Observe

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
	- Easting = 673603.41 - Northing = 1600102.34 - Name = NK
30. เลือก Output items แล้วเลือกข้อมูลนำออกตามที่ต้องการ	

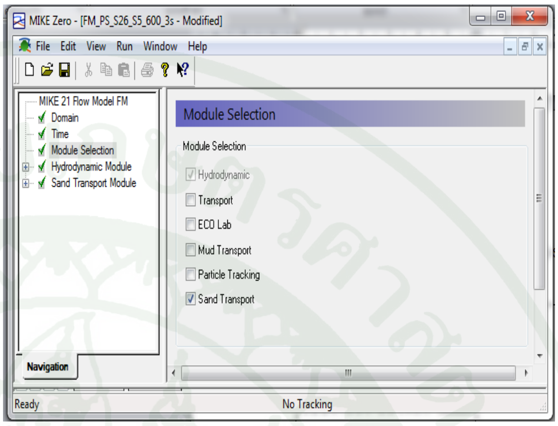
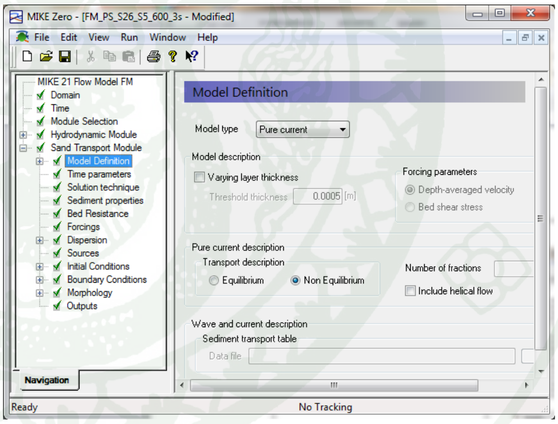
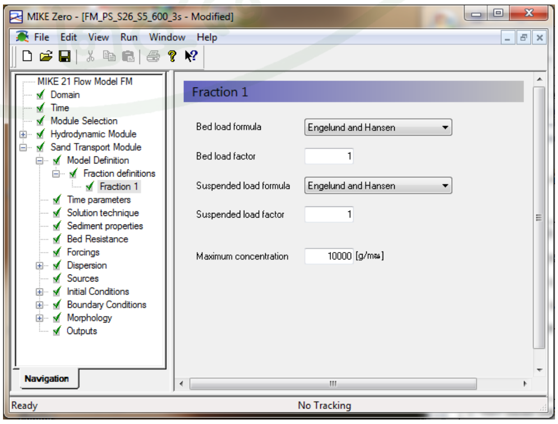
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ฉ

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน MIKE21-HD/ST

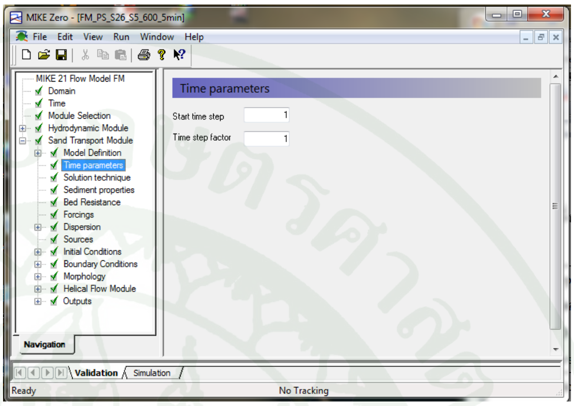
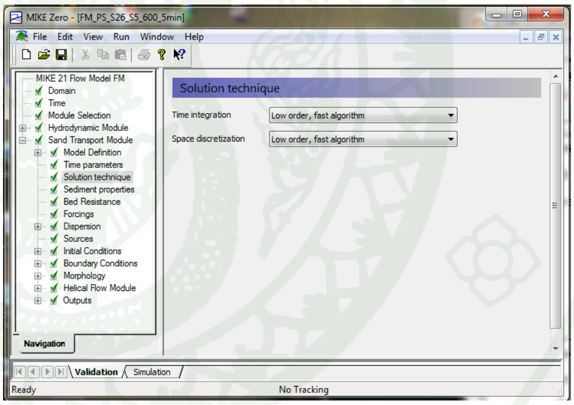
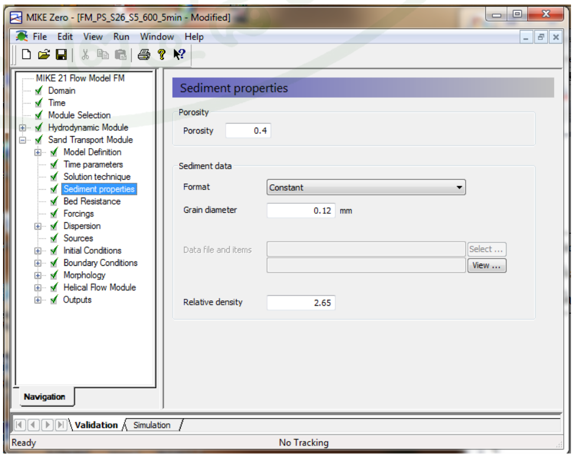
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน MIKE21-HD/ST

ขั้นตอน	โปรแกรม
1. เปิดไฟล์แบบจำลอง MIKE21-HD ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว (รวมถึงการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง) แล้วคลิก Module Selection แล้วเลือก Sand Transport	
2. คลิก Model Definition จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ และกำหนดค่าต่างๆ ดังภาพ	
3. คลิก Model Definition > Fraction definitions > Fraction 1 ในส่วนนี้ เป็นการเลือกทฤษฎีการเคลื่อนที่ของตะกอนที่นำมาใช้ในแบบจำลอง	

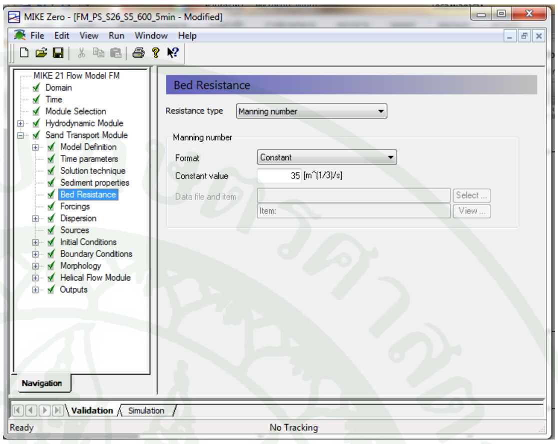
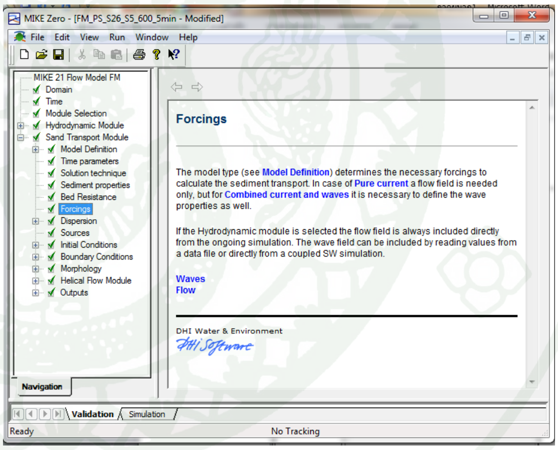
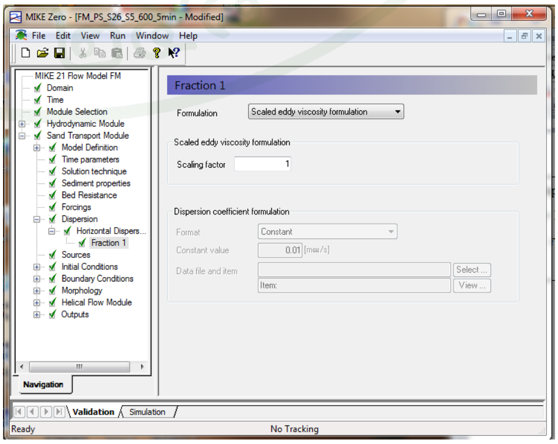
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
4. คลิก Time parameters แล้วระบุตัวตัวเลขให้สอดคล้องกลับแบบจำลอง MIKE21-HD หรือระบุให้ Stat time step กับ Time step factor เป็น 1	
5. คลิก Solution technique จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ แล้วเลือก Time integration กับ Space discretization	
6. คลิก Sediment properties จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ หน้าต่างนี้เป็นการระบุคุณสมบัติของตะกอน	

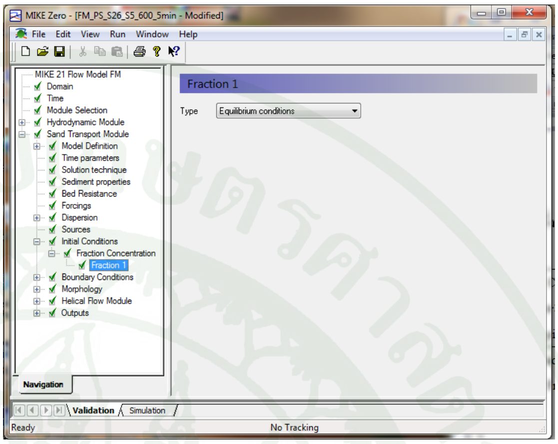
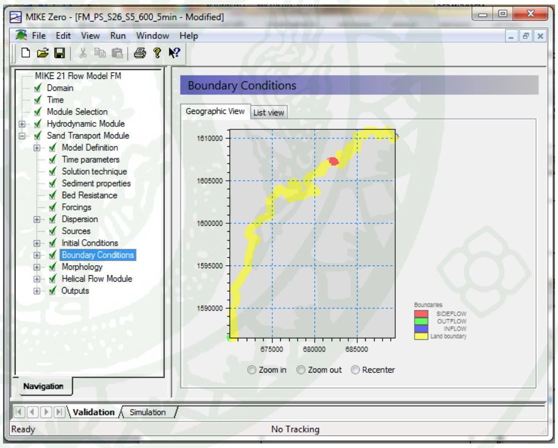
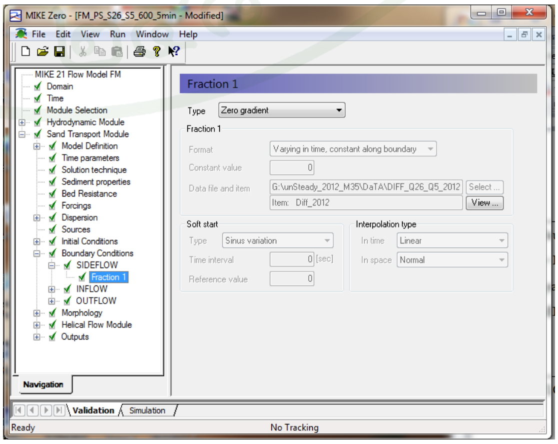
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
7. คลิก Bed Resistance จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ เป็นการกำหนดค่าความต้านทานท้องน้ำ ซึ่งในครั้งนี้ได้กำหนดให้เป็นค่าคงที่ *ควรระบุให้ตรงกับแบบจำลอง MIKE21-HD	
8. คลิก Forcings ไม่ต้องทำอะไรทั้งสิ้น (ใช้ตาม Default)	
9. คลิก Dispersion > Horizontal Dispersion > Fraction 1 แล้วเลือก Formulation การแพร่กระจายของตะกอน	

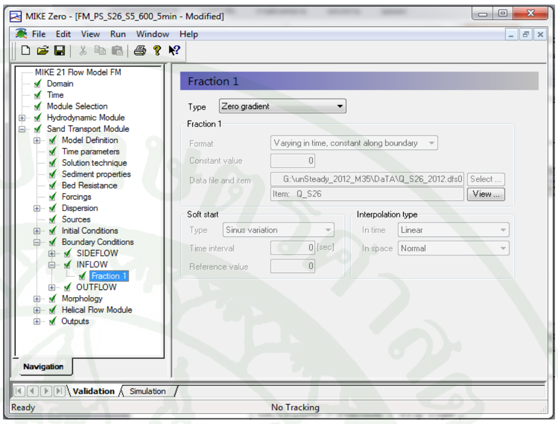
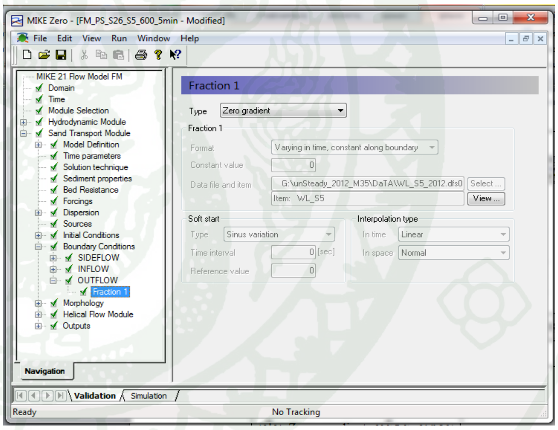
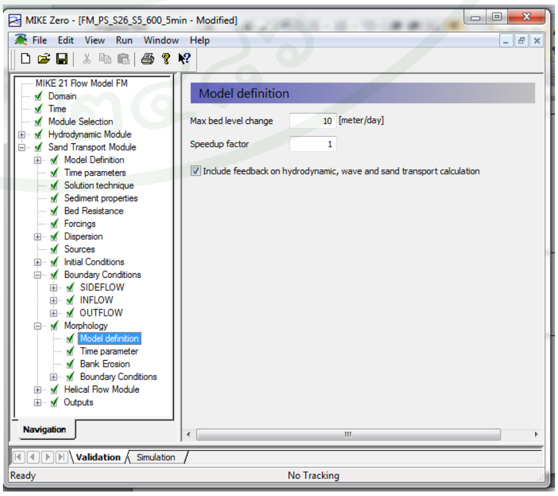
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
10. Initial Conditions > Fraction Concentration > Fraction 1 แล้วระบุ Type เป็น Equilibrium Conditions	
12. คลิก Boundary Conditions จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ	
13. คลิก Boundary Conditions > SIDEFLOW > Fraction 1 ระบุ Type เป็น Zero gradient หรือระบุตามแบบจำลอง MIKE21-HD ก็ได้	

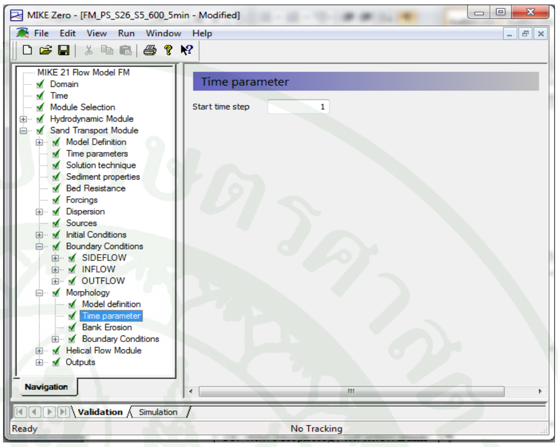
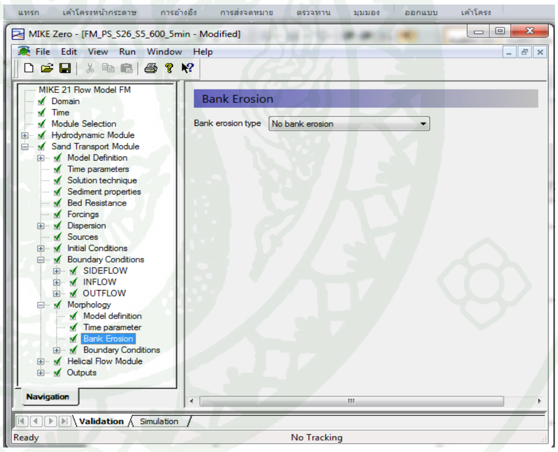
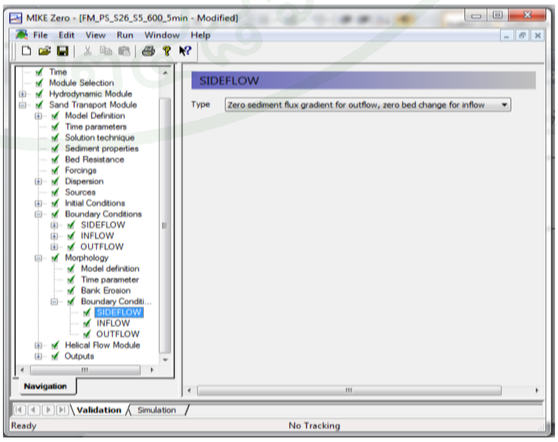
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
14. คลิก Boundary Conditions > INFLOW > Fraction 1 ระบุ Type เป็น Zero gradient หรือระบุตามแบบจำลอง MIKE21-HD ก็ได้	
15. คลิก Boundary Conditions > OUTFLOW > Fraction 1 ระบุ Type เป็น Zero gradient หรือระบุตามแบบจำลอง MIKE21-HD ก็ได้	
16. คลิก Morphology แล้วเลือก Model definition จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ และระบุตัวเลขดังภาพ	

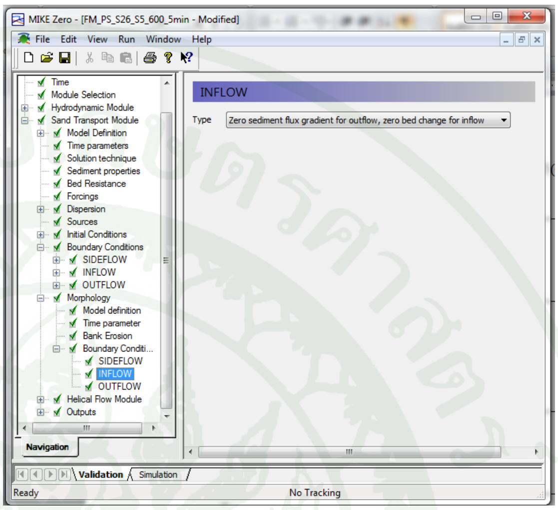
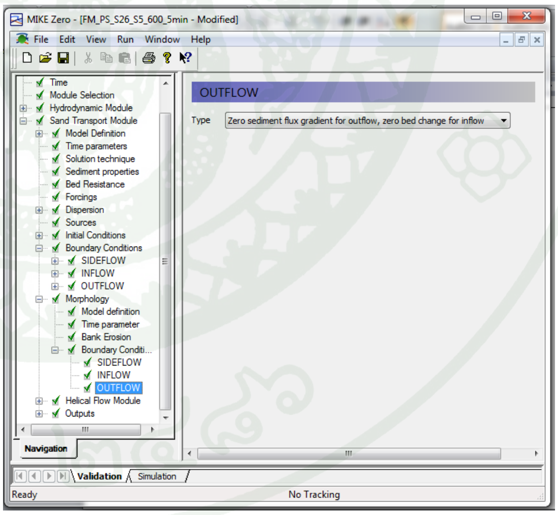
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>โปรแกรม</th></tr>
<tr><td>17. คลิก Morphology แล้วเลือก Time parameter จะเห็นเป็นหน้าต่าง ดังภาพ และระบุตัวเลขดังภาพ</td><td>
</td></tr>
<tr><td>18. คลิก Morphology แล้วเลือก Bank Erosion จะเห็นเป็นหน้าต่าง ดังภาพ และระบุตัวเลขดังภาพ</td><td>
</td></tr>
<tr><td>19. คลิก Boundary Conditions > SIDEFLOW แล้วระบุ Type</td><td>
</td></tr>
</table>

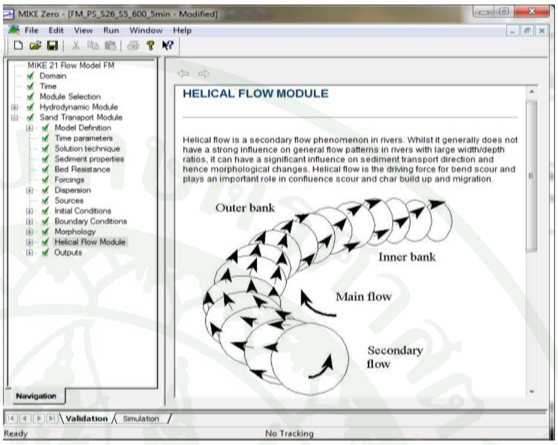
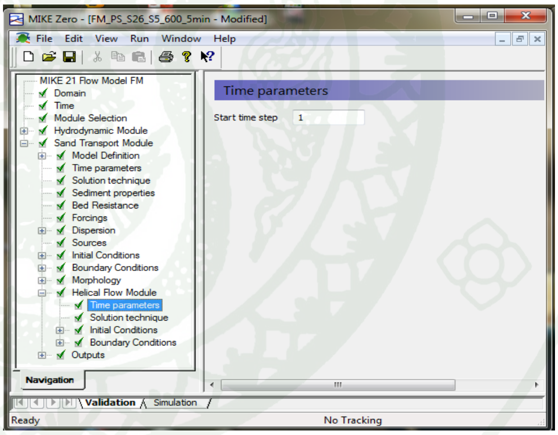
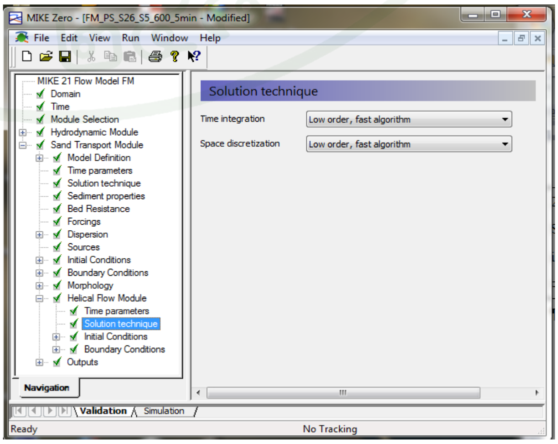
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
20. คลิก Boundary Conditions > INFLOW แล้วระบุ Type	
21. คลิก Boundary Conditions > OUTFLOW แล้วระบุ Type	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

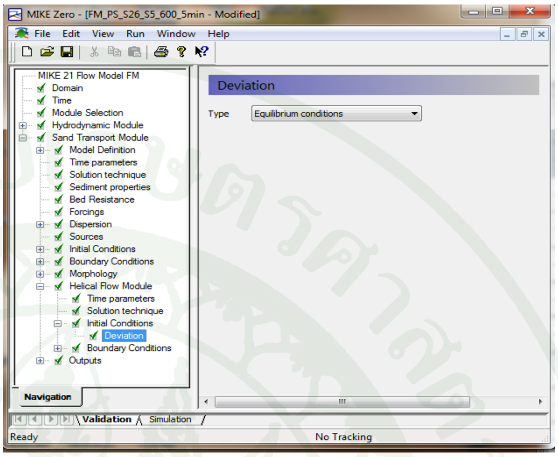
<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>โปรแกรม</th></tr>
<tr><td>22. คลิก Helical Flow Module
จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ</td><td></td></tr>
<tr><td>23. คลิก Helical Flow Module >
Time parameters แล้วระบุค่า
Start time step</td><td></td></tr>
<tr><td>24. คลิก Helical Flow Module >
Solution technique แล้วระบุค่า
Time integration กับ Space
discretization</td><td></td></tr>
</table>

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

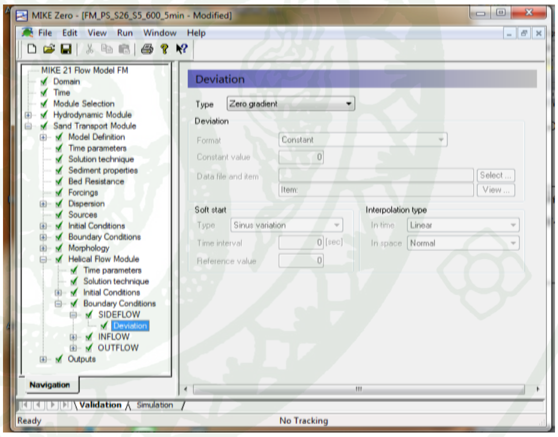
ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม

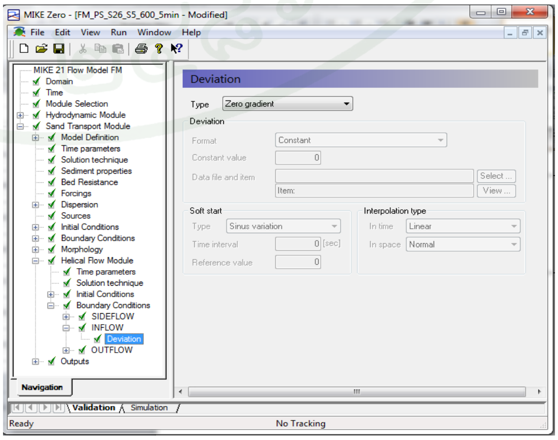
25. คลิก Initial Conditions > Devition แล้วระบุ Type



26. คลิก Boundary Conditions > SIDEFLOW > Deviation แล้วระบุ Type

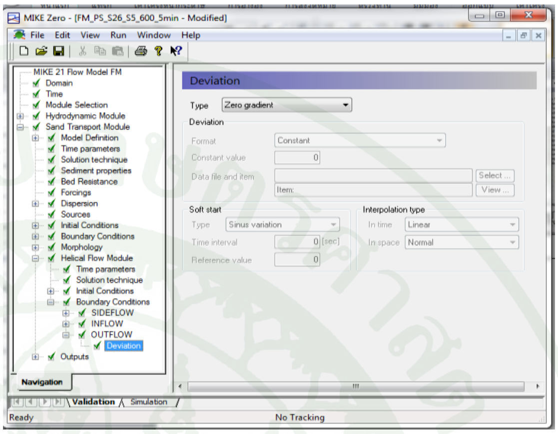
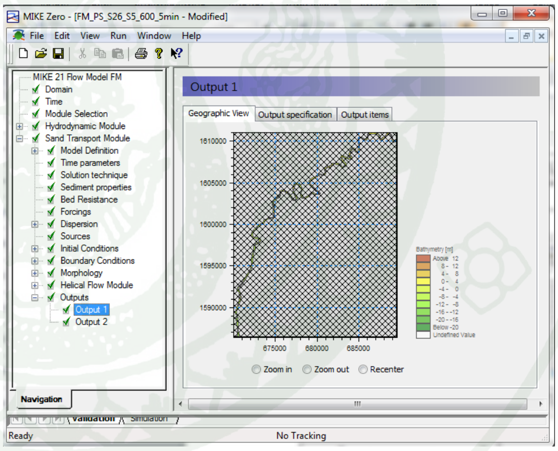
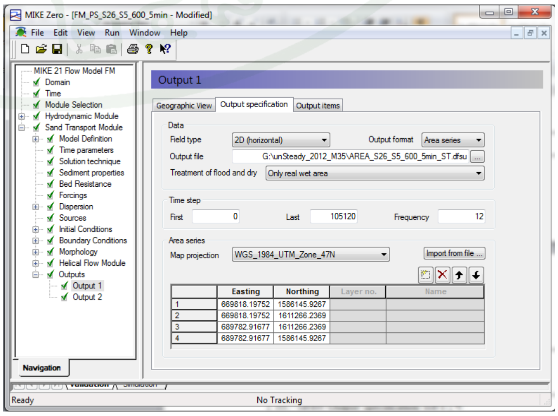


27. คลิก Boundary Conditions > INFLOW > Deviation แล้วระบุ Type



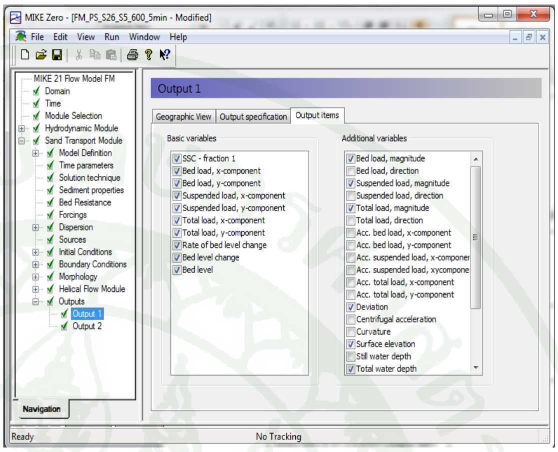
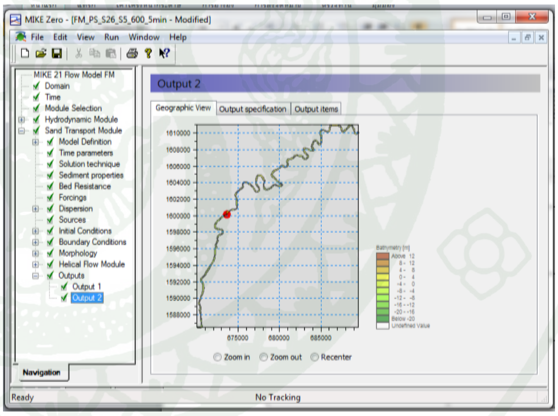
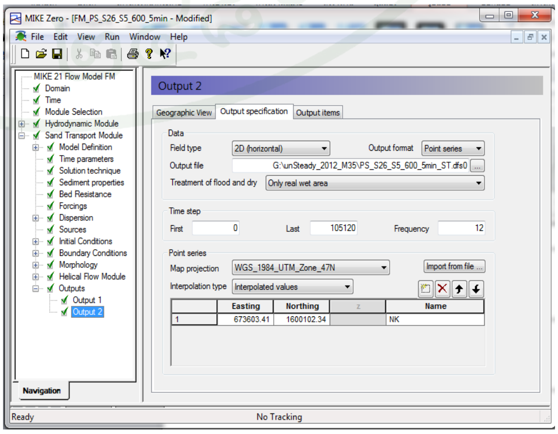
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
28. คลิก Boundary Conditions > OUTFLOW > Deviation แล้วระบุ Type	
29. คลิก Outputs แล้วเลือก Output 1 จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ	
30. เลือก Output specification แล้วเลือก Output format เป็นแบบ Area series และทำการบันทึก Output file โดยตั้งชื่อไฟล์ Output file ว่า AREA_S26_S5_600_5min_ST_750	

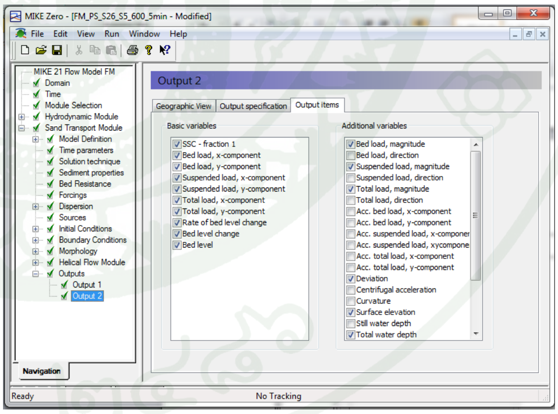
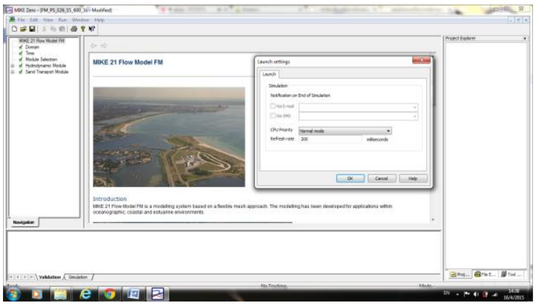
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
31. เลือก Output items แล้วเลือกข้อมูลนำออกตามที่ต้องการ	
32. คลิก Outputs แล้วเลือก Output 2 จะเห็นเป็นหน้าต่างดังภาพ	
33. เลือก Output specification แล้วกำหนดข้อมูล และทำการบันทึก Output file	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
	Data - Output format = Point series - Output file = PS_S26_S5_600_5min_HD_750 **Point series** - Map projection = WGS_1984_UTM_Zone_47N - Interpolation type = Interpolated values - พิกัด Observe - Easting = 673603.41 - Northing = 1600102.34 - Name = NK
34. เลือก Output items แล้วเลือกข้อมูลนำออกตามที่ต้องการ	
35. เมื่อทำการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน MIKE21-HD/ST เสร็จแล้ว ไปที่ Run>OK	

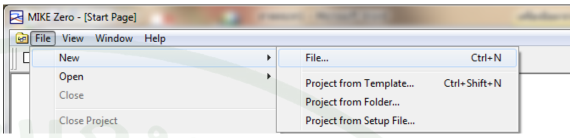
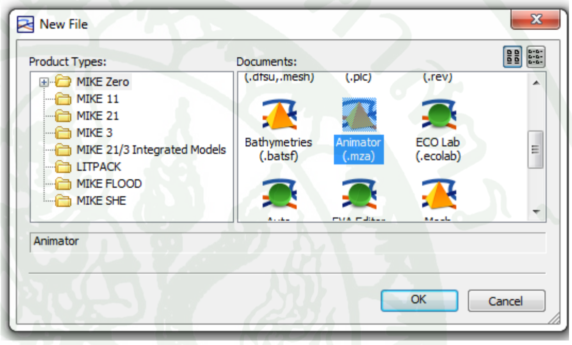
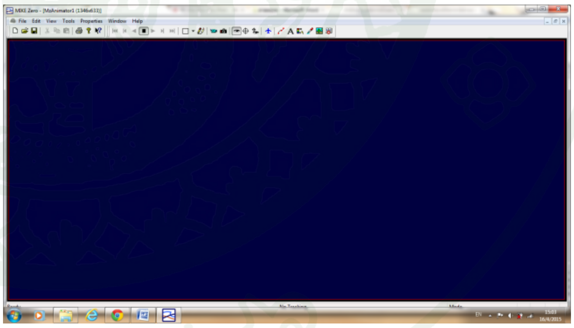
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ช

ขั้นตอนการแสดงผลด้านออก (Animator)

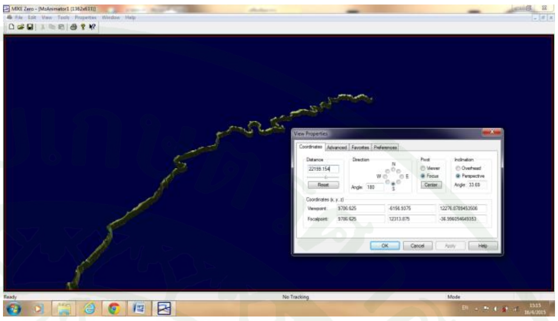
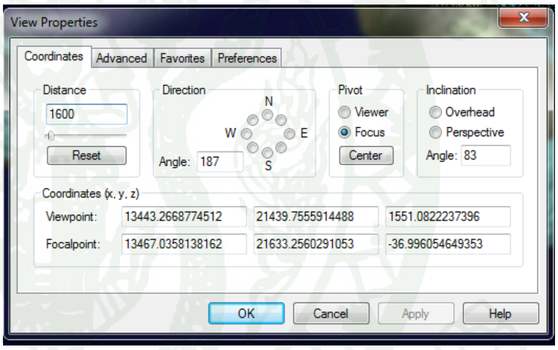
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ขั้นตอนการแสดงผลด้านออกแบบ Velocity Vector

ขั้นตอน	โปรแกรม
1. เปิดโปรแกรม MIKE Zero แล้วกดที่ File>New หรือ Ctrl-N หรือ	
2. เลือก MIKE21 แล้วเลือก Animator จากนั้นจึงกด OK	
3. เมื่อเลือก Animator จะปรากฏหน้าต่างดังภาพ	
4. ไปที่ Tools > Add Files to project แล้วเลือกเปิดไฟล์ชื่อ AREA_S26_S5_ 600_5min_HD_750.dfsu จะได้ดังภาพ	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

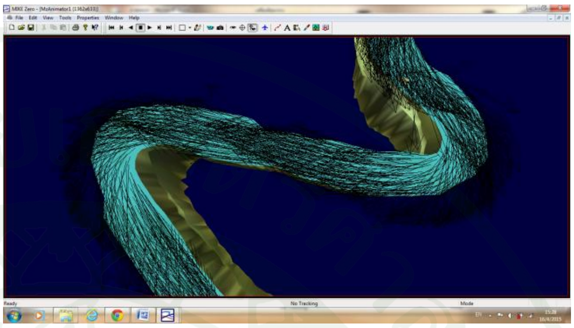
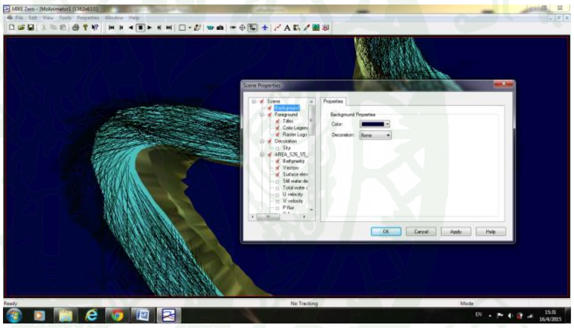
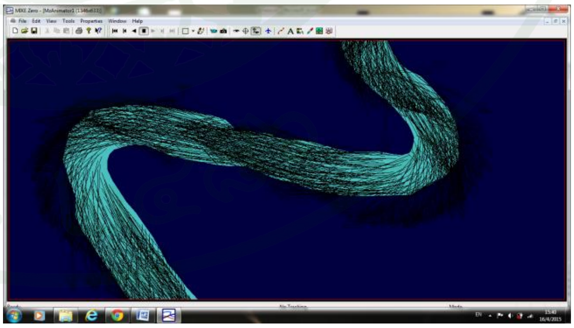
ตารางผนวกที่ ช1 (ต่อ)

<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>โปรแกรม</th></tr>
<tr><td>5. ไปที่ Properties > View
จะได้ดังภาพ</td><td></td></tr>
<tr><td>6. ทำการตั้งค่าใน View Properties</td><td>

Distance
- 1600
Direction
- Angle = 187
Inclination
- Angle = 83</td></tr>
</table>

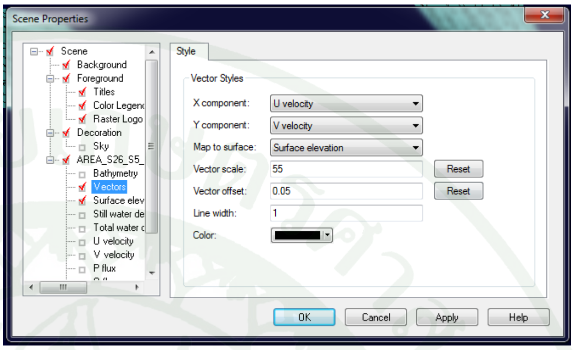
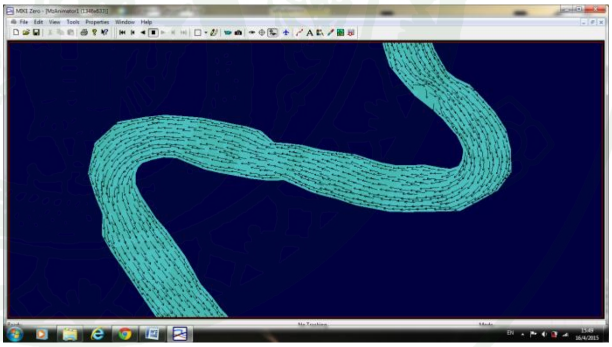
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ช1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
7. เมื่อทำการตั้งค่าใน View Properties เสร็จแล้ว กด OK จะได้ดังภาพ	
8. ไปที่ Properties > Scene จะได้ดังภาพ	
9. เอาเครื่องหมายถูกหน้า Bathymetry ออก แล้วกด Apply จะได้ดังภาพ	

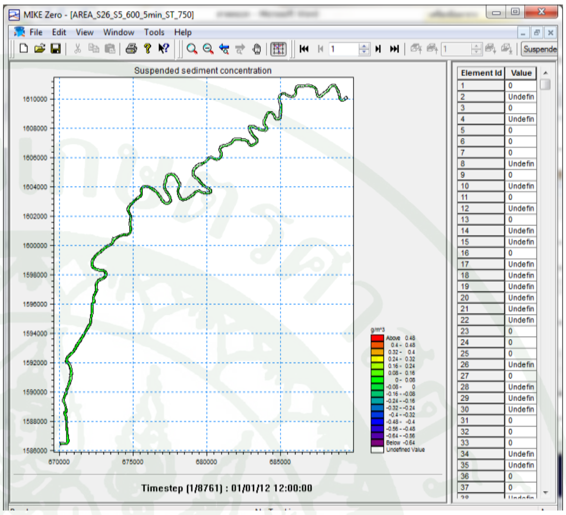
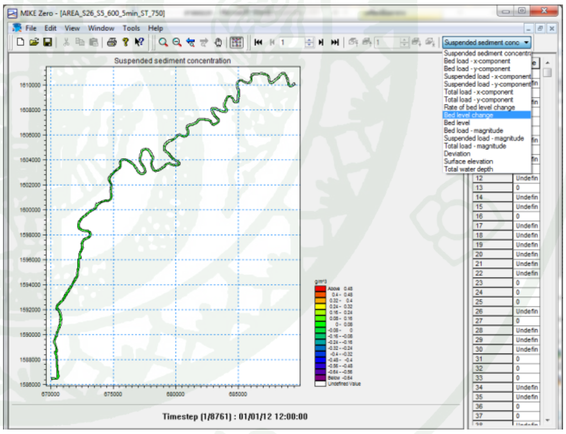
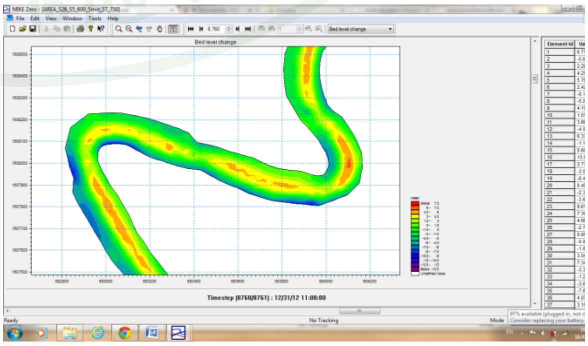
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ช1 (ต่อ)

ขั้นตอน	โปรแกรม
10. เลือก Vectors แล้วปรับค่า Vector scale และ Vector offset แล้ว Zoom ดูในส่วนที่ต้องการ	 **Style** - Vector scale = 55 - Vector offset = 0.05
11. เมื่อทำการตั้งค่าใน Scene Properties เสร็จแล้ว กด OK จะได้ดังภาพ	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 ขั้นตอนการแสดงผลด้านออกแบบ Sediment rate

ขั้นตอน	โปรแกรม
1. เปิดไฟล์ AREA_S26_S5_600_5min_ST_750.dfsu จะได้ดังภาพ	
2. เลือก Bed level change จะได้ดังภาพ	
3. เลือก Time Step ไปอันสุดท้าย แล้ว Zoom ในส่วนที่ต้องการ จะได้ดังภาพ	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-สกุล	นายอรรถพร พวงผิว
เกิดวันที่	18 ธันวาคม พ.ศ. 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดกาญจนบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา -ชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2555)
ประวัติการทำงาน	บริษัท SOUTHEAST ASIA TECHONOLOGY CO. LTD.: SEATEC GROUP (2555-2556)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน (2557)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์