การประเมินปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตในแม่น้ำยมตอนล่างด้วยแบบจำลอง SWAT

นางสาวสาธิกา บุญแก้ววรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5487230120

AN ASSESSMENT OF NITRATE AND PHOSPHATE IN LOWER YOM RIVER USING SWAT

Miss Satika Boonkaewwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตในแม่น้ำยมตอนล่างด้วยแบบจำลอง SWAT
โดย	นางสาวสาธิกา บุญแก้ววรรณ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาจอง ประทัตสุนทรสาร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ปัทมา สิงหรัภษ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.จุฬาลักษณ์ ชาญกูล)

สาธิกา บุญแก้ววรรณ : การประเมินปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตในแม่น้ำยมตอนล่างด้วยแบบจำลอง SWAT. (AN ASSESSMENT OF NITRATE AND PHOSPHATE IN LOWER YOM RIVER USING SWAT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ , 186 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพน้ำผิวดิน ปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตที่ถูกปล่อยลงสู่แม่น้ำยมตอนล่างและประเมินผลกระทบอันเกิดจากแหล่งกำเนิดมลพิษที่มีจุดกำเนิดแน่นอนและไม่แน่นอนเช่น ชุมชนเมืองและพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดยูโทรฟิเคชั่นที่มีผลต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำและสุขภาพของมนุษย์ โดยใช้แบบจำลองอุทกวิทยา SWAT แม่น้ำยมตอนล่างตั้งอยู่ทางตอนเหนือของประเทศไทย มีพื้นที่ 14,613.62 ตารางกิโลเมตร โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือการเก็บตัวอย่างน้ำจากภาคสนามมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำเพื่อนำผลเข้าสู่แบบจำลองจำนวน 14 สถานี ในเดือนพฤษภาคมและเดือนสิงหาคม พ.ศ.2555-2556 โดยพบว่าอุณหภูมิน้ำมีค่าเฉลี่ย 30.62 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดด่างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.6 ค่าออกซิเจนละลาย ความสกปรกในรูปสารอินทรีย์ ไนเตรท-ไนโตรเจน (NO_3-N) และ ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.10 3.50 1.02 และ 0.74 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่คุณภาพน้ำจัดอยู่ในเกณฑ์ดี (แหล่งน้ำผิวดินประเภทที่2) สามารถใช้ประโยชน์เพื่อการประมง ได้แก่ อำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย (YO07) และอำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่ (YO09) ส่วนบริเวณที่แหล่งน้ำจัดอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรมมาก (แหล่งน้ำผิวดินประเภทที่5) สามารถใช้ประโยชน์เพื่อการคมนาคมคือ อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย (YO06 และ W03) และส่วนที่สองคือ แบบจำลองปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต ทำการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลองใน 3 ส่วน คือ น้ำท่า ตะกอน ไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต (ช่วงปี พ.ศ.2543 ถึงปีพ.ศ.2556) ที่สถานีทั้ง 5 ของกรมชลประทานได้แก่ สถานี Y.6 Y.4 Y.16 Y.17 และ Y.5 ผลจากแบบจำลองระหว่างค่าจากการตรวจวัดจริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันอยู่ในระดับดี กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) ของปริมาณน้ำท่า ตะกอน ไนเตรทและฟอสเฟต มีค่าเท่ากับ 0.75 0.67 0.72 และ 0.74 ตามลำดับ ผลการคำนวณจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าทั้งปริมาณและคุณภาพน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

นอกจากนี้งานวิจัยได้มีการจำลองสถานการณ์ จำนวน 3 กรณี กรณีที่ 1 พื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมดเปลี่ยนเป็นพื้นที่นาข้าว กรณีที่ 2 พื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมดเปลี่ยนเป็นข้าวโพด กรณีที่ 3 คือ ชุมชนเมืองเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟตเพิ่มสูงสุดในกรณีที่ 1 ของทุกสถานีตรวจวัด โดยมีค่าเฉลี่ยไนเตรทและฟอสเฟตเพิ่มขึ้นร้อยละ 23.18 (0.76 mg/l) และร้อยละ 18.40 (0.70 mg/l) ตามลำดับ ผลจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าพื้นที่นาข้าวเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษหลักที่ทำให้ปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตไหลลงสู่แม่น้ำยม ยกเว้นที่สถานี Y.4 อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย พบไนเตรทและฟอสเฟตเพิ่มสูงสุดในกรณีที่ 3 โดยมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 (0.21 mg/l) และร้อยละ 20 (0.22 mg/l) ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นที่พบจากการจำลองทั้ง 3 สถานการณ์ มีปริมาณเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินในทุกกรณี นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณน้ำท่าในแม่น้ำยมตอนล่างที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูฝน

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

5487230120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEYWORDS: NITRATE / PHOSPHATE / LAND USE / SWAT / YOM RIVER BASIN

SATIKA BOONKAEWWAN: AN ASSESSMENT OF NITRATE AND PHOSPHATE IN LOWER YOM RIVER USING SWAT. ADVISOR: ASST. PROF. DR.SRILERT CHOTPANTARAT, 186 pp.

The objectives of this research are to evaluate the surface water quality data, nitrate-N concentrations (NO_3-N) and phosphate(PO_4^{3-}) discharging along the lower Yom river and to assess the relative impact of point source and non-point sources, such as urbanization and agricultural activities, causing eutrophication on surface waters with adverse effects on aquatic ecosystems and human health using mathematical model "SWAT" for water quality. The Lower Yom River Basin is located in the north of Thailand which covered area 14,613.62 square kilometers. The study was divided into two parts: first part was the water sampling in the river, which were collected from 14 stations during 2012 - 2013 twice a year -- in May (summer), and in August (rainy season) into SWAT model. The average temperature was 30.62 C and average pH was 7.6. The average concentrations of DO, BOD, NO_3-N and PO_4^{3-} were 5.10, 3.50, 1.02 and 0.74 mg/l, respectively. The results revealed that water quality at Sawankalok District, Sukothai Province (YO07) and Wangching District, Phrae Province (YO09) were defined as a good quality properly used for the fishery purpose. In contrast, at Meuang District, Sukothai Province (YO06 and W03), the measured river quality were lower than the Thailand Surface Water Quality Standard and Classification. The second part was nitrate-N and phosphate modeling. This study carried out calibration and validation using SWAT model in terms of streamflow, sediment, nitrate-N and phosphate concentration (Year 2000-2013) for 5 RID (the Royal Irrigation Department) streamflow gauging stations. The model was well correlated with observed data in lower Yom River. The coefficient of determination (R^2) values of runoff, sediment, nitrate and phosphate were 0.75 , 0.67 , 0.72 and 0.74 , respectively. Furthermore, this research showed that the observed and simulated water quantity and quality were not significantly different at the 95% confidence level.

Additionally, this research simulated 3 scenarios as follows: 1) agricultural areas were transformed to paddy fields, 2) agricultural areas were transformed to corn area and 3) all communities along the river was transformed to urban areas having one point source per one community. The results of scenario 1 found that nitrate and phosphate were increased in all observatory stations. The nitrate and phosphate concentrations were increased on the average of 23.18% (0.76 mg/l) and 18.40% (0.70 mg/l), respectively. The simulated results indicate that paddy fields are the major pollution sources of nitrate and phosphate loading in Yom River. Except for station Y.4 at Muang Sukhothai, it found that nitrate and phosphate were a highest increase on the average of 18% (0.21 mg/l) and 20% (0.22 mg/l), respectively. These concentrations derived from 3 scenarios exceeded the standard. Furthermore, nitrate and phosphate concentrations correspond to the high flow rates in lower Yom river and mostly occur in rainy season.

Field of Study: Environmental Science Student's Signature .....

Academic Year: 2013 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความรู้ แนวคิด ข้อเสนอแนะ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด จนงานศึกษาวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้ศึกษาจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาจอง ประทัตสุนทรสาร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ปัทมา สิงหรักษ์ และอาจารย์ ดร.จุฬาลักษณ์ ชาญกูล ที่ให้ความกรุณาเกี่ยวกับข้อคำแนะนำต่างๆ ที่มีคุณค่าต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนส่งเสริมการศึกษา ตลอดจนเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดเสมอมา

ขอขอบคุณนายศรายุทธ วงษาศรี และนายปริญญา ขำวารี ผู้ให้คำปรึกษาเรื่องแบบจำลอง SWAT อาจารย์สัญชัย เอี่ยมประเสริฐ และนายจาตุรนต์ กอนกุล ผู้ให้คำปรึกษาเรื่องระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ นางสาววิชชุดา พลสาย และนายปวีร์ คล่องเวสสะ ผู้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ข้อมูลตลอดจนการดำเนินการเก็บตัวอย่างในภาคสนาม ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆทุกคนที่คอย ให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจ ซึ่งผู้ศึกษาต้องขอขอบพระคุณทุกท่านที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ที่ให้ความช่วยเหลือในงานศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทางสำนักสิ่งแวดล้อมภาคที่2 ลำปาง และสำนักสิ่งแวดล้อมภาคที่3 พิษณุโลกที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำในภาคสนาม ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลคุณภาพน้ำในแม่น้ำยม สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง 1

สารบัญภาพ 1

หน้า 1

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 สมมติฐานการวิจัย 3

1.4 กรอบแนวความคิด 3

1.5 ขอบเขตการวิจัย 3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.7 ขั้นตอนการวิจัย 5

บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 ธาตุอาหารพืชในแหล่งน้ำ 6

2.1.1 ไนโตรเจน (nitrogen) 7

2.1.2 ฟอสฟอรัส (phosphorus) 10

2.2 แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 13

2.2.1 การคำนวณทางอุทกวิทยาส่วนบนผืนดิน (Land phase) 13

2.2.2 การคำนวณทางอุทกวิทยาส่วนการเคลื่อนที่ในลำน้ำ (Routing phase) 18

2.2.3 การคำนวณปริมาณตะกอนในแบบจำลอง SWAT 19

2.2.4 การคำนวณคุณภาพน้ำในแบบจำลอง SWAT 21

2.2.5 การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง 25

2.2.6 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Model sensitivity analysis) 26

2.2.7 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Model uncertainty analysis) 26

หน้า

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 27
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง SWAT ในต่างประเทศ 27
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง SWAT ในประเทศไทย 29
2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในแม่น้ำยม 31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการศึกษา 35
3.1 รวบรวมข้อมูลในพื้นที่แม่น้ำยมตอนล่าง 35
3.1.1 อาณาเขตและที่ตั้ง 35
3.1.2 สภาพภูมิประเทศ 36
3.1.3 สภาพภูมิอากาศ 36
3.1.4 การใช้ประโยชน์ที่ดิน 36
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานศึกษา 43
3.2.1 อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ 43
3.2.2 อุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากภาคสนาม 44
3.3 การเก็บตัวอย่างน้ำในภาคสนาม 44
3.3.1 ตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างน้ำ 44
3.3.2 วิธีการเก็บตัวอย่างและการตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต 52
3.4 การรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ในแม่น้ำยมตอนล่าง 53
3.5 การสร้างแบบจำลอง SWAT แม่น้ำยมตอนล่าง 54
3.5.1 การกำหนดขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำ 56
3.5.2 การกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) 58
3.5.3 การนำเข้าข้อมูลสภาพภูมิอากาศ 63
3.5.4 การนำเข้าข้อมูลสถานีตรวจวัดน้ำท่า 64
3.5.5 การนำเข้าข้อมูลอ่างเก็บน้ำ 65
3.5.6 การนำเข้าข้อมูลการผันน้ำและความต้องการใช้น้ำในพื้นที่ 65
3.5.7 การนำเข้าข้อมูลจุดปล่อยน้ำเสีย 67
3.5.8 การนำเข้าข้อมูลปฏิทินกิจกรรมการเพาะปลูกพืช 68
3.6 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Sensitivity analysis) 72

หน้า

3.7 การประเมินปริมาณน้ำท่า ปริมาณตะกอน ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต 72
3.7.1 การปรับเทียบและสอบทานปริมาณน้ำท่า 72
3.7.2 การปรับเทียบและสอบทานปริมาณตะกอน 74
3.7.3 การปรับเทียบและสอบทานปริมาณปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต 75
3.8 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Uncertainty analysis) 76
3.9 การจำลองสถานการณ์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อปริมาณ 77
ไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต 77
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล 82
4.1 ผลการเก็บตัวอย่างน้ำในภาคสนามและการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ 82
4.1.1 ผลการเก็บตัวอย่างน้ำในภาคสนาม 82
4.1.2 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ 84
4.2 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Sensitivity analysis) 92
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์กับปริมาณน้ำท่า 93
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์กับปริมาณตะกอนในลำน้ำ 95
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์กับปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนและ
ฟอสเฟต 96
4.3 ผลการประเมินปริมาณน้ำท่า ปริมาณตะกอน ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต 99
4.3.1 ผลการปรับเทียบและสอบทาน (Model Calibration and Verification) 99
ปริมาณน้ำท่า 99
4.3.2 ผลการปรับเทียบและสอบทาน (Model Calibration and Verification) 105
ปริมาณตะกอน 105
4.3.3 ผลการปรับเทียบและสอบทาน (Model Calibration and Verification) 111
ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต 111
4.4 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Uncertainty analysis) 133
4.5 ผลการจำลองสถานการณ์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อปริมาณ 154
ไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต 154
4.5.1 กรณีที่ 1 พื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมดเปลี่ยนเป็นพื้นที่นาข้าว 154
4.5.2 กรณีที่ 2 พื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมดเปลี่ยนเป็นพื้นที่พืชไร่ (ข้าวโพด) 158

หน้า

4.5.3 กรณีที่ 3 ชุมชนเมืองเพิ่มขึ้น 162
4.6 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อคุณภาพน้ำผิวดิน 167
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 173
5.1 สรุปผลการศึกษาจากการออกภาคสนาม 173
5.2 สรุปผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ SWAT 174
5.2.1 สรุปผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Sensitivity analysis) 174
5.2.2 สรุปผลการประเมินปริมาณน้ำท่า ตะกอน ไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต 175
5.2.3 สรุปผลจากการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Uncertainty analysis) 177
5.2.4 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต 177
5.4 ข้อเสนอแนะ 179
รายการอ้างอิง 180
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 186

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ค่า CN สำหรับพื้นที่ทำการเกษตร 16
ตารางที่ 2-2 เกณฑ์ในการใช้ค่า R^2 และ r ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเส้นกำหนดประสิทธิภาพในการทำนายผลของแบบจำลอง 26
ตารางที่ 3-1 ตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างน้ำ 45
ตารางที่ 3-2 พารามิเตอร์ที่ศึกษาวิจัยและวิธีการวิเคราะห์ 52
ตารางที่ 3-3 ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง SWAT 53
ตารางที่ 3-4 ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินปีพ.ศ.2546 และปีพ.ศ.2552 58
ตารางที่ 3-5 ข้อมูลปริมาตรอ่างเก็บน้ำในแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย 65
ตารางที่ 3-6 ข้อมูลจากการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกปล่อยลงสู่แม่น้ำยม 68
ตารางที่ 3-7 ปฏิทินกิจกรรมการเพาะปลูกข้าวนาปี 69
ตารางที่ 3-8 ปฏิทินกิจกรรมการเพาะปลูกข้าวโพด 70
ตารางที่ 3-9 ปฏิทินกิจกรรมการเพาะปลูกยางพารา 71
ตารางที่ 3-10 จำนวนประชากรรายตำบลในพื้นที่ลุ่มน้ำยม ปีพ.ศ.2544-2554 78
ตารางที่ 3-11 ข้อมูลความเข้มข้นของสารที่จุดกำเนิดมลพิษชุมชนเมือง 79
ตารางที่ 4-1 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ 88
ตารางที่ 4-2 ลำดับค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่า ปริมาณตะกอน ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนและฟอสเฟต 93
ตารางที่ 4-3 ค่าการปรับแก้พารามิเตอร์ของปริมาณน้ำท่า 100
ตารางที่ 4-4 ค่าการปรับแก้พารามิเตอร์ของปริมาณตะกอน 106
ตารางที่ 4-5 ค่าการปรับแก้พารามิเตอร์ของปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน 112
ตารางที่ 4-6 ค่าการปรับแก้พารามิเตอร์ของปริมาณฟอสเฟต 123

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1 วัฏจักรไนโตรเจน 8
รูปที่ 2-2 วัฏจักรฟอสฟอรัส 11
รูปที่ 2-3 วัฏจักรทางอุทกวิทยา 15
รูปที่ 2-4 การเคลื่อนตัวของน้ำในลำน้ำ 18
รูปที่ 2-5 ส่วนของการเคลื่อนที่ของมลสารในแบบจำลอง SWAT 21
รูปที่ 2-6 การจำลองกระบวนการเคลื่อนที่ของไนโตรเจนในแบบจำลอง SWAT 22
รูปที่ 2-7 การจำลองกระบวนการเคลื่อนที่ของฟอสเฟตในแบบจำลอง SWAT 23
รูปที่ 3-1 แผนภูมิร้อยละการใช้ที่ดินในแม่น้ำยมตอนล่าง 37
รูปที่ 3-2 แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินแม่น้ำยมตอนล่างปีพ.ศ.2552 37
รูปที่ 3-3 แผนภูมิแสดงแนวโน้มปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน ในช่วงพ.ศ.2548-2555 39
รูปที่ 3-4 แผนภูมิแสดงแนวโน้มปริมาณฟอสเฟตในช่วงพ.ศ.2548-2555 41
รูปที่ 3-5 ความเข้มข้นของฟอสเฟตเฉลี่ยรายปีในแม่น้ำยมตอนล่าง 42
รูปที่ 3-6 ความเข้มข้นของไนเตรท-ไนโตรเจนเฉลี่ยรายปีในแม่น้ำยมตอนล่าง 42
รูปที่ 3-7 ความเข้มข้นของไนเตรท-ไนโตรเจน (NO_3-N) เฉลี่ยตามฤดูกาลในแม่น้ำยมตอนล่าง 43
รูปที่ 3-8 ความเข้มข้นของฟอสเฟต (PO_4^{3}) เฉลี่ยตามฤดูกาลในแม่น้ำยมตอนล่าง 43
รูปที่ 3-9 จุดเก็บตัวอย่างน้ำในแม่น้ำยมตอนล่าง 45
รูปที่ 3-10 แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำ 51
รูปที่ 3-11 ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง SWAT แม่น้ำยมตอนล่าง 55
รูปที่ 3-12 แบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (DEM) ของแม่น้ำยมตอนล่าง 56
รูปที่ 3-13 การกำหนดขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำ อ่างเก็บน้ำ จุดผันน้ำยม-น่าน จุดรวบรวมน้ำเสียชุมชน. 57
รูปที่ 3-14 ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ.2546 59
รูปที่ 3-15 ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ.2552 60
รูปที่ 3-16 ชั้นข้อมูลความลาดชันของพื้นที่แม่น้ำยมตอนล่าง 61
รูปที่ 3-17 ชั้นข้อมูลชนิดดินของพื้นที่แม่น้ำยมตอนล่าง 62
รูปที่ 3-18 ตำแหน่งสถานีวัดสภาพภูมิอากาศในแม่น้ำยมตอนล่าง 63
รูปที่ 3-19 สถานีตรวจวัดน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนล่าง 64
รูปที่ 3-20 การกำหนดอัตราการผันน้ำและความต้องการใช้น้ำในพื้นที่แม่น้ำยมตอนล่าง 67
รูปที่ 3-21 การกำหนดข้อมูลความเข้มข้นของสารที่จุดปล่อยน้ำเสียชุมชน 67
รูปที่ 3-22 การกำหนดข้อมูลปฏิทินกิจกรรมการเพาะปลูกพืช 68
รูปที่ 3-23 สถานีที่ใช้ปรับเทียบและสอบทานแบบจำลอง 73

รูปที่ 3-24 การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 1 80
รูปที่ 3-25 การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 2 80
รูปที่ 3-26 การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 3 81
รูปที่ 4-1 การเก็บตัวอย่างภาคสนาม ครั้งที่ 1 82
รูปที่ 4-2 การเก็บตัวอย่างภาคสนาม ครั้งที่ 2 83
รูปที่ 4-3 การเก็บตัวอย่างภาคสนาม ครั้งที่ 3 83
รูปที่ 4-4 (ต่อ) แผนภูมิแสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ 92
รูปที่ 4-5 ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่า 95
รูปที่ 4-6 ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนในลำน้ำ 96
รูปที่ 4-7 ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน 97
รูปที่ 4-8 ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสเฟตในน้ำ 99
รูปที่ 4-9 ผลการปรับเทียบปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.6 100
รูปที่ 4-10 ผลการสอบทานปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.6 101
รูปที่ 4-11 ผลการปรับเทียบปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.4 101
รูปที่ 4-12 ผลการสอบทานปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.4 102
รูปที่ 4-13 ผลการปรับเทียบปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.16 102
รูปที่ 4-14 ผลการสอบทานปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.16 103
รูปที่ 4-15 ผลการปรับเทียบปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.17 103
รูปที่ 4-16 ผลการสอบทานปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.17 104
รูปที่ 4-17 ผลการปรับเทียบปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.5 104
รูปที่ 4-18 ผลการสอบทานปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.5 105

รูปที่ 4-19 ผลการปรับเทียบปริมาณตะกอนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.6 106
รูปที่ 4-20 ผลการสอบทานปริมาณตะกอนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.6 107
รูปที่ 4-21 ผลการปรับเทียบปริมาณตะกอนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.4 107
รูปที่ 4-22 ผลการสอบทานปริมาณตะกอนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.4 108
รูปที่ 4-23 ผลการปรับเทียบปริมาณตะกอนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.16 108
รูปที่ 4-24 ผลการสอบทานปริมาณตะกอนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.16 109
รูปที่ 4-25 ผลการปรับเทียบปริมาณตะกอนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.17 109
รูปที่ 4-26 ผลการสอบทานปริมาณตะกอนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.17 110
รูปที่ 4-27 ผลการปรับเทียบปริมาณตะกอนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.5 110
รูปที่ 4-28 ผลการสอบทานปริมาณตะกอนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.5 111
รูปที่ 4-29 ผลการปรับเทียบปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.6 112
รูปที่ 4-30 ผลการสอบทานปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.6 113
รูปที่ 4-31 ผลการปรับเทียบและสอบทานไนเตรท-ไนโตรเจนแสดงผลด้วย Boxplot สถานี Y.6 .. 114
รูปที่ 4-32 ผลการปรับเทียบปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.4 114
รูปที่ 4-33 ผลการสอบทานปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.4 115
รูปที่ 4-34 ผลการปรับเทียบและสอบทานไนเตรท-ไนโตรเจนแสดงผลด้วย Boxplot สถานี Y.4 .. 116

รูปที่ 4-35 ผลการปรับเทียบปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.16 116
รูปที่ 4-36 ผลการสอบทานปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.16 117
รูปที่ 4-37 ผลการปรับเทียบและสอบทานไนเตรท-ไนโตรเจนแสดงผลด้วย Boxplot สถานี Y.16 118
รูปที่ 4-38 ผลการปรับเทียบปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.17 118
รูปที่ 4-39 ผลการสอบทานปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.17 119
รูปที่ 4-40 ผลการปรับเทียบและสอบทานไนเตรท-ไนโตรเจนแสดงผลด้วย Boxplot สถานี Y.17 120
รูปที่ 4-41 ผลการปรับเทียบปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.5 120
รูปที่ 4-42 ผลการสอบทานปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.5 121
รูปที่ 4-43 ผลการปรับเทียบและสอบทานไนเตรท-ไนโตรเจนแสดงผลด้วย Boxplot สถานี Y.5 .. 122
รูปที่ 4-44 ผลการปรับเทียบปริมาณฟอสเฟตจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.6 123
รูปที่ 4-45 ผลการสอบทานปริมาณฟอสเฟต จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.6 124
รูปที่ 4-46 ผลการปรับเทียบและสอบทานฟอสเฟตแสดงผลด้วย Boxplot สถานี Y.6 125
รูปที่ 4-47 ผลการปรับเทียบปริมาณฟอสเฟต จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.4 126
รูปที่ 4-48 ผลการสอบทานปริมาณฟอสเฟตจากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.4 126
รูปที่ 4-49 ผลการปรับเทียบและสอบทานฟอสเฟตแสดงผลด้วย Boxplot สถานี Y.4 127
รูปที่ 4-50 ผลการปรับเทียบปริมาณฟอสเฟต จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.16 128
รูปที่ 4-51 ผลการสอบทานปริมาณฟอสเฟต จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.16 128
รูปที่ 4-52 ผลการปรับเทียบและสอบทานฟอสเฟตแสดงผลด้วย Boxplot สถานี Y.16 129

รูปที่ 4-53 ผลการปรับเทียบปริมาณฟอสเฟต จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.17 130
รูปที่ 4-54 ผลการสอบทานปริมาณฟอสเฟต จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.17 130
รูปที่ 4-55 ผลการปรับเทียบและสอบทานฟอสเฟตแสดงผลด้วย Boxplot สถานี Y.17 131
รูปที่ 4-56 ผลการปรับเทียบปริมาณฟอสเฟต จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.5 132
รูปที่ 4-57 ผลการสอบทานปริมาณฟอสเฟต จากการคำนวณแบบจำลอง SWAT เทียบกับค่าจากการตรวจวัดที่สถานี Y.5 132
รูปที่ 4-58 ผลการปรับเทียบและสอบทานฟอสเฟตแสดงผลด้วย Boxplot สถานี Y.5 133
รูปที่ 4-59 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของน้ำท่าในการปรับเทียบสถานี Y.6 134
รูปที่ 4-60 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของน้ำท่าในการสอบทานสถานี Y.6.. 134
รูปที่ 4-61 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของตะกอนในการปรับเทียบสถานี Y.6 135
รูปที่ 4-62 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของตะกอนในการสอบทานสถานี Y.6135
รูปที่ 4-63 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของไนเตรท-ไนโตรเจนในการปรับเทียบสถานี Y.6 136
รูปที่ 4-64 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของไนเตรท-ไนโตรเจนในการสอบทานสถานี Y.6 136
รูปที่ 4-65 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของฟอสเฟตในการปรับเทียบสถานี Y.6 137
รูปที่ 4-66 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของฟอสเฟตในการสอบทานสถานี Y.6 137
รูปที่ 4-67 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของน้ำท่าในการปรับเทียบสถานี Y.4 138
รูปที่ 4-68 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของน้ำท่าในการสอบทานสถานี Y.4.. 138
รูปที่ 4-69 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของตะกอนในการปรับเทียบสถานี Y.4 139
รูปที่ 4-70 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของตะกอนในการสอบทานสถานี Y.4139
รูปที่ 4-71 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของไนเตรท-ไนโตรเจนในการปรับเทียบสถานี Y.4 140

รูปที่ 4-72 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของไนเตรท-ไนโตรเจนในการสอบทาน สถานี Y.4 140
รูปที่ 4-73 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของฟอสเฟตในการปรับเทียบสถานี Y.4 141
รูปที่ 4-74 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของฟอสเฟตในการสอบทานสถานี Y.4 141
รูปที่ 4-75 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของน้ำท่าในการปรับเทียบสถานี Y.16 142
รูปที่ 4-76 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของน้ำท่าในการสอบทานสถานี Y.16 142
รูปที่ 4-77 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของตะกอนในการปรับเทียบสถานี Y.16 143
รูปที่ 4-78 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของตะกอนในการสอบทานสถานี Y.16 143
รูปที่ 4-79 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของไนเตรท-ไนโตรเจนในการปรับเทียบ สถานี Y.16 144
รูปที่ 4-80 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของไนเตรท-ไนโตรเจนในการสอบทาน สถานี Y.16 144
รูปที่ 4-81 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของฟอสเฟตในการปรับเทียบสถานี Y.16 145
รูปที่ 4-82 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของฟอสเฟตในการสอบทานสถานี Y.16 145
รูปที่ 4-83 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของน้ำท่าในการปรับเทียบ สถานี Y.17 146
รูปที่ 4-84 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของน้ำท่าในการสอบทานสถานี Y.17 146
รูปที่ 4-85 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของตะกอนในการปรับเทียบ 147
รูปที่ 4-86 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของตะกอนในการสอบทาน 147
รูปที่ 4-87 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของไนเตรท-ไนโตรเจนในการปรับเทียบ สถานี Y.17 148
รูปที่ 4-88 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของไนเตรท-ไนโตรเจนในการสอบทาน สถานี Y.17 148

รูปที่ 4-89 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของฟอสเฟตในการปรับเทียบ สถานี Y.17 149
รูปที่ 4-90 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของฟอสเฟตในการสอบทานสถานี Y.17 149
รูปที่ 4-91 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของน้ำท่าในการปรับเทียบสถานี Y.5 150
รูปที่ 4-92 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของน้ำท่าในการสอบทานสถานี Y.5.. 150
รูปที่ 4-93 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของตะกอนในการปรับเทียบสถานี Y.5 151
รูปที่ 4-94 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของตะกอนในการสอบทานสถานี Y.5151
รูปที่ 4-95 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของไนเตรท-ไนโตรเจนในการปรับเทียบสถานี Y.5 152
รูปที่ 4-96 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของไนเตรท-ไนโตรเจนในการสอบทานสถานี Y.5 152
รูปที่ 4-97 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของฟอสเฟตในการปรับเทียบสถานี Y.5 153
รูปที่ 4-98 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของฟอสเฟตในการสอบทานสถานี Y.5 153
รูปที่ 4-99 ผลการจำลองสถานการณ์น้ำท่ากรณีที่ 1 155
รูปที่ 4-100 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณตะกอนกรณีที่ 1 155
รูปที่ 4-101 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 1 ของสถานี Y.6 156
รูปที่ 4-102 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 1 ของสถานี Y.6..... 157
รูปที่ 4-103 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 1 ของสถานี Y.4 157
รูปที่ 4-104 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 1 ของสถานี Y.4..... 157
รูปที่ 4-105 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 1 ของสถานี Y.16..... 157
รูปที่ 4-106 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 1 ของสถานี Y.16..... 157
รูปที่ 4-107 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 1 ของสถานี Y.17..... 158
รูปที่ 4-108 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 1 ของสถานี Y.17..... 158
รูปที่ 4-109 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 1 ของสถานี Y.5 158
รูปที่ 4-110 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 1 ของสถานี Y.5..... 158

รูปที่ 4-111 ผลการจำลองสถานการณ์น้ำท่ากรณีที่ 2 159
รูปที่ 4-112 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณตะกอนกรณีที่ 2 159
รูปที่ 4-113 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 2 ของสถานี Y.6 160
รูปที่ 4-114 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 2 ของสถานี Y.6 161
รูปที่ 4-115 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 2 ของสถานี Y.4 161
รูปที่ 4-116 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 2 ของสถานี Y.4 161
รูปที่ 4-117 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 2 ของสถานี Y.16 161
รูปที่ 4-118 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 2 ของสถานี Y.16 161
รูปที่ 4-119 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 2 ของสถานี Y.17 162
รูปที่ 4-120 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 2 ของสถานี Y.17 162
รูปที่ 4-121 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 2 ของสถานี Y.5 162
รูปที่ 4-122 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 2 ของสถานี Y.5 162
รูปที่ 4-123 ผลการจำลองสถานการณ์น้ำท่ากรณีที่ 3 163
รูปที่ 4-124 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณตะกอนกรณีที่ 3 163
รูปที่ 4-125 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 3 ของสถานี Y.6 164
รูปที่ 4-126 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 3 ของสถานี Y.6 165
รูปที่ 4-127 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 3 ของสถานี Y.4 165
รูปที่ 4-128 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 3 ของสถานี Y.4 165
รูปที่ 4-129 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 3 ของสถานี Y.16 165
รูปที่ 4-130 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 3 ของสถานี Y.16 165
รูปที่ 4-131 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 3 ของสถานี Y.17 166
รูปที่ 4-132 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 3 ของสถานี Y.17 166
รูปที่ 4-133 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนกรณีที่ 3 ของสถานี Y.5 166
รูปที่ 4-134 ผลการจำลองสถานการณ์ปริมาณฟอสเฟตกรณีที่ 3 ของสถานี Y.5 166
รูปที่ 4-135 แผนที่แสดงการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีผลกระทบต่อปริมาณไนเตรท
บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนล่างช่วงปี พ.ศ.2548-2556 170

รูปที่ 4-136 แผนที่แสดงการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีผลกระทบต่อปริมาณฟอสเฟต บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนล่างช่วงปี พ.ศ.2548-2556 171
รูปที่ 4-137 สถานีปรับปรุงคุณภาพน้ำ เทศบาลเมืองสุโขทัยธานี 172
รูปที่ 4-138 ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เทศบาลตำบลบางระกำ จ.พิษณุโลก 172