การประยุกต์ใช้เทคนิคคาลแมนฟิลเตอร์ในการพยากรณ์ปริมาณน้ำหลากเข้าเขื่อนอุบลรัตน์

นาย อรรถนันท์ เล็กอุทัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พศ.2536

ISBN 974-583-102-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

019252
ม7131571

APPLICATION OF KALMAN FILTER TECHNIQUE FOR FLOOD FORECASTING AT UBOLRATANA DAM

Mr.Atthanan Lekuthai

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for The Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1993

ISBN 974-583-102-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้เทคนิคคาลแมนฟิลเตอร์ในการพยากรณ์ปริมาณน้ำหลากเข้าเขื่อนอุบลรัตน์
โดย	นาย อรรถนันท์ เล็กอุทัย
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.ดร.สุทัศน์ วีสกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.ดร.เสรี จันทรโยธา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรวุฒิ ประดิษฐานนท์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์)

.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.สุทัศน์ วีสกุล)

.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.เสรี จันทรโยธา)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

อรรถนันท์ เล็กอุทัย : การประยุกต์ใช้เทคนิคคาลแมนฟิลเตอร์ในการพยากรณ์ปริมาณน้ำหลากเข้าเขื่อนอุบลรัตน์ (APPLICATION OF KALMAN FILTER TECHNIQUE FOR FLOOD FORECASTING AT UBOLRATANA DAM) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร.สุทัศน์ วีสกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร.เสรี จันทรโยธา, 130 หน้า. ISBN 974-583-102-6

พลเอกสุเทพ สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การพยากรณ์ปริมาณน้ำท่าในฉับพลัน (Real Time Forecasting) เป็นการคำนวณน้ำท่าโดยใช้ข้อมูลที่บันทึกได้ใหม่ล่าสุดเช่น 1 ชั่วโมง หรือ 1 วัน ก่อนเวลาที่ต้องพยากรณ์มาใช้คำนวณ การพยากรณ์ในลักษณะนี้สามารถให้ผลการคำนวณที่ทันต่อเหตุการณ์ เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation) และเตือนอุทกภัย (Flood Warning)

การศึกษาครั้งนี้มุ่งที่จะประยุกต์ใช้ Kalman Filter Technique ผนวกกับ Lump Model ชนิด Non-Linear Storage Function Model(NLSFM)เพื่อปรับเทียบแบบจำลอง(Calibration) และเปรียบเทียบผลการคำนวณน้ำท่ากับผลจากการประยุกต์ใช้ NLSFM เพียงอย่างเดียว Kalman Filter Technique เป็นเทคนิคที่สามารถใช้ค่าความผิดพลาดจากผลการคำนวณของแบบจำลองคณิตศาสตร์ (NLSFM) ในปัจจุบันไปปรับพารามิเตอร์ของสมการหลักในแบบจำลองเพื่อการคำนวณปริมาณน้ำท่าในครั้งต่อไปได้ถูกต้องยิ่งขึ้น จากผลการปรับเทียบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลจำนวน 10 ปี สรุปได้ว่าค่าที่เหมาะสมในการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของแบบจำลองคือค่า Manning Coefficient เท่ากับ 0.030,Initial Error Covariance Matrix เท่ากับ 0.01% ของ State Variable Matrix และกำหนด Initial Model Error Covariance Matrix เท่ากับ 0.01% ของพารามิเตอร์ของสมการหลักในแบบจำลองคณิตศาสตร์

ผลการประยุกต์ใช้ NLSFM และ Kalman Filter Model(KFM) กับข้อมูลปริมาณฝนจากการวัดจริงจำนวน 8 ปี สรุปได้ว่าการใช้ KFM ให้ผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าที่ดีกว่าผลจาก NLSFM คือให้ค่าเฉลี่ย รากของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 1.4644 mm และ 2.2563 mm ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดการคำนวณปริมาณน้ำท่าสูงสุดเท่ากับ 15.70% และ 29.05%,ค่าความผิดพลาดเวลาที่เกิดปริมาณน้ำท่าสูงสุดเท่ากับ 0-1วัน และ 0-8 วัน ตามลำดับ

ผลการประยุกต์ใช้ NLSFM และ KFM กับข้อมูลปริมาณฝนจากการคำนวณล่วงหน้าแบบ 1- 2- 3- และ 4-Day Average สรุปได้ว่า Kalman Filter Technique สามารถช่วยให้ผลการคำนวณถูกต้องกว่าการใช้ NLSFM อย่างเดียว ซึ่งดีกว่าในลักษณะเดียวกับการใช้ข้อมูลฝนจากการวัดจริงทั้งทางด้านค่าเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดการคำนวณปริมาณน้ำท่าสูงสุด และค่าความผิดพลาดการคำนวณเวลาที่เกิดปริมาณน้ำท่าสูงสุด

จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Student t-Test กับผลการประยุกต์ใช้ KFM และ NLSFM กับข้อมูลทั้งแบบปริมาณฝนจากการวัดจริงและปริมาณฝนจากการคำนวณล่วงหน้า ปรากฏว่าผลจากการใช้ KFM ไม่แตกต่างแบบมีนัยสำคัญ (Not Significantly Difference) เมื่อเทียบกับผลจากการใช้ NLSFM แต่มีแนวโน้มว่าให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องกว่า

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สุทัศน์ วีสกุล

ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

##C215043 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEYWORD : KALMAN FILTER
ATTHANAN LEKUTHAI : APPLICATION OF KALMAN FILTER TECHNIQUE FOR FLOOD FORECASTING AT UBOLRATANA DAM. THESIS ADVISER : SUTAT WEESAKUL,D.Eng. THESIS CO-ADVISER : SEREE CHANYOTHA, Ph.D. 130 pp. ISBN 974-583-102-6

Real time forecasting is the calculation of direct runoff by using the latest data recorded,for example 1 hour or 1 day prior to forecasting. This method of forecasting can provide more accurate result which is very useful for reservoir operation and flood warning.

The objective of this thesis is to apply Kalman Filter Technique to Lump Model which is a Non-Linear Storage Function Model (NLSFM) in order to calibrate and compare the result of direct runoff by using NLSFM alone. Kalman Filter Technique utilizes the current error from NLSFM to improve the parameter of system model so that the next calculation of direct runoff will be more accurate. After calibrating model with 10 year data, it was found that the appropriate initial parameters are the following,Manning Coefficient is equal to 0.030,Initial Error Covariance Matrix is best represented by 0.01% of State Variable Matrix and Initial Model Error Covariance Matrix is used as 0.01% of System Model's Parameters

The application of 8 year actual rainfall data to NLSFM and Kalman Filter Model (KFM) lead to the conclusion that the result of KFM is better than that of NLSFM,the average RMSE are 1.4644 mm and 2.2563 mm,the average errors of peak discharge are 15.70% and 29.05%,the errors of time to peak are 0-1 day and 0-8 day respectively.

The application of 1-2-3 and 4-Day Average forecasted rainfall to NLSFM and KFM yield the same conclusions as the previous case that is average RMSE,the average errors of peak discharge and the errors of time to peak of KFM are better than NLSFM alone.

However,Student t-Test of KFM's and NLSFM's results,using actual rainfall and forecasted rainfall data,prove that they are not significantly different. But there is a tendency in favor of KFM to provide slightly more accurate result.

ภาควิชา Civil Engineering ลายมือชื่อนิสิต Att Lhthai.

สาขาวิชา Water Resources Engineering ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Sutat Weesakol

ปีการศึกษา 1992 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรวุฒิ ประดิษฐานนท์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆตลอดจนให้เกียรติเป็นประธานกรรมการและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ในสาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่าน ที่ได้เมตตาประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆทั้งทางวิชาการและแนวทางการดำเนินชีวิตที่ถูกต้องในสังคม

ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุทัศน์ วีสกุล และ อาจารย์ ดร.เสรี จันทรโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของข้าพเจ้าเป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดการทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าจนสำเร็จลุล่วงมาด้วยดี

การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จะสำเร็จไม่ได้เลยหากขาดข้อมูลที่ได้รับอนุเคราะห์จาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ. ที่นี้ อีกทั้งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้บังคับบัญชาทุกระดับชั้นของข้าพเจ้าอันได้แก่ นายจรูญ กมลรัตน์ ,นายกิตละ เทพลักษณ์เลขา และ นายศิริพงศ์ หังสพฤกษ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำต่างๆตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และ น้าของข้าพเจ้าที่ได้ให้โอกาสและสนับสนุนในทุกๆด้านเพื่อให้ข้าพเจ้าได้รับการศึกษาในระดับต่างๆจนถึงปัจจุบัน

อรรถนันท์ เล็กอุทัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญรูป..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2

1.3 ขอบข่ายของการศึกษา..... 2

1.4 พื้นที่ทำการศึกษา..... 3

1.5 การศึกษาที่ผ่านมา..... 4

1.6 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา..... 5

1.7 ผลที่ได้รับจากการศึกษา..... 6

บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

2.1 ทฤษฎีที่ใช้สำหรับการเตรียมข้อมูลและข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ..... 11

2.1.1 การคำนวณปริมาณฝนรายวันเฉลี่ยทั้งพื้นที่

(Areal Daily Rainfall)..... 11

2.1.2 การแยกปริมาณน้ำท่า (Direct Runoff Separation)..... 12

2.1.3 การคำนวณปริมาณฝนส่วนเกินรายวันเฉลี่ยทั้งพื้นที่

(Areal Daily Excess Rainfall)..... 13

2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นสำหรับ Non-Linear Storage Function Model.... 14

2.3 ทฤษฎีการประยุกต์ใช้ Kalman Filter Technique

ผนวกกับแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 16

2.3.1 System Model..... 16

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.2 Measurement Model..... 18

2.3.3 Linearization of State Space Equation..... 19

2.3.4 Method of Solution..... 22

บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ Kalman Filter..... 33

3.2 โครงสร้างของแบบจำลอง..... 34

3.3 ขั้นตอนการทำงานและข้อมูลที่โปรแกรมต้องการ..... 35

3.4 ตัวอย่างของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมเตรียมข้อมูลและแบบจำลองคณิตศาสตร์..40

บทที่ 4 การปรับเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์

4.1 หลักเกณฑ์การปรับเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 52

4.2 การพิจารณาค่า CE และ CS ที่เหมาะสม..... 53

4.3 การพิจารณาค่า Manning Coefficient ที่เหมาะสม..... 55

4.4 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม..... 56

4.4.1 การพิจารณาค่า RMSE จากการคำนวณปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายวัน... 57

4.4.2 การพิจารณาค่าความผิดพลาดการคำนวณปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายวันสูงสุด58

4.4.3 การพิจารณาค่าความผิดพลาดการคำนวณเวลาที่เกิดปริมาณน้ำท่า
เฉลี่ยรายวันสูงสุด..... 58

4.5 สรุปผลการปรับเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 58

บทที่ 5 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

5.1 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์..... 70

5.2 ลักษณะการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์..... 71

5.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนส่วนเกิน
เฉลี่ยรายวันของพื้นที่จากข้อมูลการวัดฝนจริง..... 72

5.3.1 การประยุกต์ใช้ Non-Linear Storage Function Model.... 72

5.3.2 การประยุกต์ใช้ Kalman Filter Model..... 73

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.3.3 สรุปผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูล
ปริมาณฝนส่วนเกินเฉลี่ยรายวันจากข้อมูลการวัดฝนจริง..... 74
5.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝน
ส่วนเกินเฉลี่ยรายวันจากการคำนวณล่วงหน้า..... 76
5.4.1 การประยุกต์ใช้ NLSFM..... 76
5.4.2 การประยุกต์ใช้ Kalman Filter Model..... 77
5.4.3 สรุปผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูล
ปริมาณฝนส่วนเกินเฉลี่ยรายวันจากการคำนวณล่วงหน้า..... 77
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ
6.1 การปรับเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 108
6.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์..... 109
6.2.1 การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูล
ปริมาณฝนส่วนเกินเฉลี่ยรายวันจากข้อมูลการวัดฝนจริง..... 109
6.2.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูล
ปริมาณฝนส่วนเกินเฉลี่ยรายวันจากการคำนวณล่วงหน้า..... 110
6.3 ข้อเสนอแนะ..... 112
เอกสารอ้างอิง..... 115
ภาคผนวก ก แสดงที่มาของสมการค่าของพารามิเตอร์ในแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 118
ภาคผนวก ข แสดงการคำนวณ Transition Matrix
และ Input Transition Matrix..... 122
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยวิธี Student t-Test..... 125
ภาคผนวก ง แสดงเส้นชั้นน้ำฝนปี 1988..... 126
ภาคผนวก จ การพยากรณ์ปริมาณฝนส่วนเกินเฉลี่ยรายวันล่วงหน้า..... 128
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างผลการคำนวณโดยพิจารณาน้ำท่าจากฝนเพียงลูกเดียว..... 129
ประวัติผู้ศึกษา..... 130

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

1.1 รายชื่อสถานีวัดปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา 7

3.1 ลักษณะข้อมูลในขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเตรียมข้อมูล 41

3.2 ตัวอย่างผลการใช้โปรแกรมเตรียมข้อมูล..... 42

3.3 ตัวอย่างผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์..... 43

4.1 ค่า RMSE ของการคำนวณปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายวันจากการกำหนด
ค่า CE และ CS ต่างๆ กัน..... 60

4.2 ผลการคำนวณโดยใช้ค่า Manning Coefficient ที่เหมาะกับข้อมูลแต่ละปี..... 61

4.3 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์จากการใช้พารามิเตอร์ที่ตัดสินใจเลือก... 62

4.4 ความผิดพลาดการคำนวณเวลาที่เกิดปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายวันสูงสุด..... 63

5.1 ผลการประยุกต์ใช้ NLSFM โดยใช้ข้อมูลฝนส่วนเกินเฉลี่ยรายวันจากข้อมูลจริง.... 83

5.2 ผลการประยุกต์ใช้ Kalman Filter Model โดยใช้ข้อมูลฝนส่วนเกิน
เฉลี่ยรายวันจากข้อมูลจริง..... 83

5.3 สรุปผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ กับข้อมูลฝนจริงจากการวัด..... 83

5.4 ผลการประยุกต์ใช้ NLSFM โดยใช้ข้อมูลฝนจากการคำนวณล่วงหน้า..... 84

5.5 ผลการประยุกต์ใช้ Kalman Filter Model โดยใช้ข้อมูลฝนจากการคำนวณล่วงหน้า 84

5.6 สรุปผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลฝน
จากการคำนวณล่วงหน้าแบบ 1-Day Average..... 85

5.7 สรุปผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลฝน
จากการคำนวณล่วงหน้าแบบ 2-Day Average..... 85

5.8 สรุปผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลฝน
จากการคำนวณล่วงหน้าแบบ 3-Day Average..... 85

5.9 สรุปผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลฝน
จากการคำนวณล่วงหน้าแบบ 4-Day Average..... 85

5.10 สรุปผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์เมื่อใช้ข้อมูลฝน
จากการคำนวณล่วงหน้าแบบต่างๆ..... 86

สารบัญรูป

รูป		หน้า
1.1	พื้นที่ศึกษา	8
1.2	ตำแหน่งสถานีวัดน้ำฝนน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา	9
1.3	สภาพเหตุการณ์น้ำล้น Spillway ปี 1978	10
2.1	ตัวอย่างลักษณะกริดสำหรับการคำนวณปริมาณฝนเฉลี่ยของพื้นที่	27
2.2	แสดงส่วนประกอบของชลภาพ (Hydrograph)	28
2.3	แสดงการแยก Base Flow ออกจากชลภาพ	28
2.4	ความสัมพันธ์ของปริมาณฝนรายวันเฉลี่ยทั้งพื้นที่ และปริมาณฝนส่วนเกินรายวันเฉลี่ยทั้งพื้นที่	29
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Storage กับ อัตราการไหล (q) ของสมการหลักในแบบจำลองคณิตศาสตร์ชนิด LSFM และ NLSFM	29
2.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_2 และ P_2 กับ m	30
2.7	ผังแสดง Discrete Kalman Filter Timing	31
2.8	ขั้นตอนการคำนวณโดยใช้ Kalman Filter Algorithm	32
3.1	ลักษณะขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเตรียมข้อมูล	46
3.2	ส่วนประกอบของ Kalman Filter Model	47
3.3	ขั้นตอนและลักษณะข้อมูลสำหรับโปรแกรมเตรียมข้อมูล	48
3.4	ตัวอย่างการคำนวณ Initial Error Covariance Matrix	49
3.5	ตัวอย่างการกำหนด Initial Model Error Covariance Matrix	50
3.6	ขั้นตอนการทำงานของ Kalman Filter Model	51
4.1	ค่าเฉลี่ย RMSE จากผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายวันเมื่อกำหนดค่า CS และ CE ต่างๆ กัน	64
4.2	ค่า RMSE ของการคำนวณปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายวันที่ค่า Manning Coefficient ต่างๆ	66
4.3	ผลการคำนวณเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์	68
5.1	การคำนวณปริมาณฝนส่วนเกินเฉลี่ยรายวันล่วงหน้า	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
5.2	ผลการประยุกต์ใช้ NLSFM กับข้อมูลปริมาณฝนจริงจากการวัด	88
5.3	ผลการประยุกต์ใช้ Kalman Filter Model กับข้อมูลปริมาณฝนจริงจากการวัด	90
5.4	ผลการประยุกต์ NLSFM กับข้อมูลฝนปี 1988 จากการคำนวณล่วงหน้า	92
5.5	ผลการประยุกต์ NLSFM กับข้อมูลฝนปี 1977 จากการคำนวณล่วงหน้า	93
5.6	ผลการประยุกต์ NLSFM กับข้อมูลฝนปี 1976 จากการคำนวณล่วงหน้า	94
5.7	ผลการประยุกต์ NLSFM กับข้อมูลฝนปี 1982 จากการคำนวณล่วงหน้า	95
5.8	ผลการประยุกต์ NLSFM กับข้อมูลฝนปี 1970 จากการคำนวณล่วงหน้า	96
5.9	ผลการประยุกต์ NLSFM กับข้อมูลฝนปี 1983 จากการคำนวณล่วงหน้า	97
5.10	ผลการประยุกต์ NLSFM กับข้อมูลฝนปี 1984 จากการคำนวณล่วงหน้า	98
5.11	ผลการประยุกต์ NLSFM กับข้อมูลฝนปี 1986 จากการคำนวณล่วงหน้า	99
5.12	ผลการประยุกต์ Kalman Filter Model กับข้อมูลฝนปี 1988 จากการคำนวณล่วงหน้า	100
5.13	ผลการประยุกต์ Kalman Filter Model กับข้อมูลฝนปี 1977 จากการคำนวณล่วงหน้า	101
5.14	ผลการประยุกต์ Kalman Filter Model กับข้อมูลฝนปี 1976 จากการคำนวณล่วงหน้า	102
5.15	ผลการประยุกต์ Kalman Filter Model กับข้อมูลฝนปี 1982 จากการคำนวณล่วงหน้า	103
5.16	ผลการประยุกต์ Kalman Filter Model กับข้อมูลฝนปี 1970 จากการคำนวณล่วงหน้า	104
5.17	ผลการประยุกต์ Kalman Filter Model กับข้อมูลฝนปี 1983 จากการคำนวณล่วงหน้า	105
5.18	ผลการประยุกต์ Kalman Filter Model กับข้อมูลฝนปี 1984 จากการคำนวณล่วงหน้า	106
5.19	ผลการประยุกต์ Kalman Filter Model กับข้อมูลฝนปี 1986 จากการคำนวณล่วงหน้า	107

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย