

การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการปรับปรุงระบบระบายน้ำในเมือง

นายพิสิฐ ศรีวรรณัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2534


ISBN 974-579-164-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

017365

110312997

Application of Mathematical Model in Urban Drainage System Improvement



Mr.Pisith Srivaranun

ศูนย์วิทยทรัพยากร
A Thesis Submitted in Pratial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Civil Engineering

Graduate School
Chulalongkorn University

1991

ISBN 974-579-164-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โดย

ภาควิชา

อาจารย์ที่ปรึกษา

การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการปรับปรุงระบบระบายน้ำในเมือง

นายนิสิฐ ศรีวรราชภัฏ

วิศวกรรมโยธา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจริต คุณชนกุลวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรราชภัฏ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรวิทย์ ประดิษฐ์นนท์)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ชำรง เปรมปรีดิ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุทัศน์ วิสกุล)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจริต คุณชนกุลวงศ์)

พิสิฐ ศรีวรรณ : การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการปรับปรุงระบบระบายน้ำ
ในเมือง (APPLICATION OF MATHEMATICAL MODEL IN URBAN DRAINAGE SYSTEM
IMPROVEMENT) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สุจิต คุณธนกุลวงศ์, 272 หน้า.
ISBN 974-579-164-4.

ปัญหาน้ำท่วม เป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นอยู่เสมอสำหรับพื้นที่ในเขตเมือง โดยเฉพาะตัวเมืองที่ตั้ง
อยู่บนที่ราบใกล้ริมแม่น้ำ ซึ่งมีความลาดชันของพื้นที่น้อย ปัญหานี้จะยิ่งทวีความรุนแรงขึ้นตามการพัฒนา
ของเมือง ระบบระบายน้ำจึงเปลี่ยนจากระบบง่าย ๆ ไปสู่ระบบที่มีความสลับซับซ้อนยิ่งขึ้น ดังนั้น
จึงมีการประมวลขบวนการทางอุทกวิทยาและชลศาสตร์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ พัฒนาเป็นแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์ขึ้น

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWMM (RUNOFF Block และ EXTRAN
Block) มาเป็นเครื่องมือช่วยทางด้านเทคนิค โดยใช้พื้นที่ศึกษาภายในเขตการศึกษา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยฝั่งตะวันออก บริเวณหอประชุมกลางและศูนย์สารนิเทศ ซึ่งมีพื้นที่ทั้งหมด 90,927
ตารางเมตร และความลาดชันเฉลี่ยของท่อระบายน้ำ 1:500 นอกจากนี้ยังมีการเก็บข้อมูลภาคสนามคือ
ข้อมูลฝน ค่าระดับน้ำ และวัดอัตราการไหล รวมทั้งทดลองหาค่าอัตราการซึมของพื้นที่รับน้ำด้วย

ผลการเก็บข้อมูลภาคสนามได้นำมาวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของพื้นที่ทางด้านอุทกวิทยา พบว่า
ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่าได้ค่าตั้งแต่ 0.08-0.18 ที่ความเข้มฝนในช่วง 17.0-99.0 มม./ชม. และ
เวลาน้ำหลากสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 23.9 นาที

ในการเปรียบเทียบแบบจำลอง ได้ทำการวิเคราะห์ความไวของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งพบว่า
ค่าความลึกเก็บกักจะมีผลต่อการเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่ารวมมากที่สุด และพบว่าทั้งค่าความกว้างการไหล
ป่าตามผิวและค่าสัมประสิทธิ์แมนนิ่งของท่อระบายน้ำ มีอิทธิพลมากต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและ
อัตราการไหลออกสูงสุด และมีอิทธิพลมากกว่าค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบได้
มีดังนี้ ค่าความลึกเก็บกักตามผิวของพื้นที่ที่บึงน้ำเท่ากับ 34.0 มม. ของพื้นที่ขีมน้ำเท่ากับ 37.0 มม.
ค่าสัมประสิทธิ์แมนนิ่งพื้นที่ที่บึงน้ำเท่ากับ 0.050 ของพื้นที่ขีมน้ำเท่ากับ 0.300 และได้ค่าสัมประสิทธิ์
แมนนิ่งของท่อ/รางระบายน้ำ เท่ากับ 0.038

การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการประเมินและออกแบบปรับปรุงระบบระบายน้ำ ได้ใช้ฝนออกแบบ
ที่คาบการกลับ 2 และ 5 ปี ช่วงเวลา 2 ชั่วโมง และเสนอแนวทางปรับปรุงเพื่อเลือกที่เป็นไปได้ไว้
3 แนวทาง คือ (1) การใช้สระเก็บกักน้ำภายในพื้นที่อย่างเดียว (2) การใช้สระเก็บกักน้ำ และเชื่อม
ท่อ (3) การใช้สระเก็บกักน้ำ, เชื่อมท่อให้มากขึ้น และเพิ่มขนาดท่อ/รางระบายน้ำ และพบว่าทาง
เลือกที่ 3 เป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดและสามารถแก้ปัญหาที่ท่วมได้ทั้งหมด นอกจากนี้การศึกษาครั้งนี้
ยังได้สรุปประเด็นปัญหาการประยุกต์ใช้แบบจำลองไว้ด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2533

ลายมือชื่อนิติ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

PISITH SRIVARANUN : APPLICATION OF MATHEMATICAL MODEL FOR URBAN DRAINAGE SYSTEM IMPROVEMENT. THESIS ADVISOR : ASSI.PROF.DR. SUCHARIT KOONTANAKULVONG, 272 PP. ISBN 974-579-164-4.

Flood is one of the most important social problem which usually occurs in the urban area, especially in the city located in the low lying plain near the river. Flood problem becomes more severe with the urbanization of city. The simple drainage system in the city then gradually changed to be a more complicated one. The simulation of hydrologic and hydraulic processes by mathematical model becomes more necessary to tackle flood problem.

In this study, SWMM (RUNOFF and EXTRAN Block) was applied as a tool to improve drainage scheme and the zone of Central Hall and Auditorium Hall in the east campus of Chulalongkorn University was selected as the study area with the total area of 90,927 sq.m. and average drainage channel slope of 1:500. Field data i.e. rainfall, water level and flow rate in the drainage channel and infiltration rate were collected to be a basic data for model calibration.

From the field data investigation, hydrological characteristics of the study area were analysed. The runoff coefficient of the study area was found to be 0.08-0.18 with the range of rainfall intensity of 17.0-99.0 mm/hr and average time of concentration was found to be 23.9 minutes.

Sensitivity tests of each parameters in the model were conducted and it is found that the depression storage of the impervious and pervious land were the most sensitive parameters to the water balance. The characteristic width and Manning coefficient of the drainage channel were the most sensitive parameters to the change of water level and peak flow in the channel. The calibration results show that the depression storage and the Manning coefficient of the impervious and pervious land equal 34.0, 37.0 mm and 0.05, 0.30 respectively. The Manning coefficient of drainage channel was found to be 0.038.

The drainage improvement scheme of the study area was considered by adopting 2 hours design storm with 2 and 5 years return period and three possible alternatives: (i) retention pond only (ii) retention pond and pipe linkage (iii) retention pond, pipe linkage and pipe size enlargement, were studied and the third alternative was found to be the most effective. The problems in model application to study drainage improvement scheme from the study were also summarized for future study.

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2533

ลายมือชื่อนิติ *Pisith Srivaranun*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *Sucharit Koontanakulvong*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ชำรง เปรมปรีดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สूरูณี ประดิษฐานนท์ อาจารย์ ดร. สุกฤษ์ วิสกุล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจรีต คุณชนกุลวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำข้อคิดเห็นต่าง ๆ อย่างใกล้ชิด ขณะศึกษาวิจัยด้วยดีมาตลอด และข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณบรรดาคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ทำให้ข้าพเจ้าเข้าใจและตระหนักถึงความสำคัญของศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำ ในการนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อสังคม และประเทศชาติ และเนื่องจากการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัยบางส่วน ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้ด้วย

อนึ่งข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร กรมอุตุนิยมวิทยา และหน่วยงานต่าง ๆ ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เช่น ชมรมวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่จากหน่วยงานดังกล่าว และนิสิตทุก ๆ ท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือการวิจัยทั้งทางด้านข้อมูล และอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ นอกจากนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณ คุณวารุณี โพธิ์เรือง ที่ช่วยเหลืออย่างมากในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ คุณสุรัชย์ กร้ออักษร และคุณเอกพงษ์ กิรติวศิน ที่ช่วยในการเขียนรูป จัดรูป และเพื่อน ๆ ทุกคน ที่เป็นกำลังใจให้จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา ผู้ล่วงลับ และพี่ ๆ ของข้าพเจ้าทุกคน ซึ่งมีส่วนสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นิสิฐ ศีร์วารานนท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง | ญ |
| สารบัญรูป | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา | 2 |
| 1.3 ขอบข่ายของการศึกษา | 2 |
| 1.4 พื้นที่ทำการศึกษา | 3 |
| 1.5 การศึกษาที่ผ่านมา | 6 |
| 1.6 การดำเนินการศึกษา | 10 |
| 1.7 ผลที่ได้รับจากการศึกษา | 10 |
| บทที่ 2 แบบจำลองและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา | |
| 2.1 ระบบระบายน้ำในเขตเมือง | 11 |
| 2.2 ระบบย่อยของน้ำท่าผิวดิน (surface runoff subsystem) | 11 |
| 2.2.1 ข้อมูลนำเข้าอุทกวิทยา (hydrologic input) | 13 |
| 2.2.2 ขบวนการไหลบ่าของน้ำบนผิวดิน (overland flow process) | 13 |
| 2.2.2.1 การซึมผ่านของน้ำลงดิน (infiltration) | 13 |
| 2.2.2.2 การกักเก็บบนผิวดิน (surface storage) | 14 |
| 2.3 ระบบย่อยของการขนส่งน้ำ (transportation subsystem) | 14 |
| 2.4 ระบบย่อยของแหล่งรับน้ำ (receiving water subsystem) | 16 |
| 2.5 ระบบระบายน้ำารวม (combined sewer subsystem) | 16 |
| 2.6 ชนิดแบบจำลองการระบายน้ำในเขตเมือง | 18 |
| 2.6.1 แบบจำลองแบบง่าย (simple models) | 21 |
| 2.6.2 แบบจำลองเพื่อการวางแผน (planning models) | 21 |
| 2.6.3 แบบจำลองการวิเคราะห์และออกแบบ (analysis and design models) | 23 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า | |
|-----------|---|----|
| 2.6.4 | แบบจำลองเพื่อการดำเนินงานและควบคุม (operation and control models) | 30 |
| 2.6.5 | แบบจำลองอื่น ๆ (other models) | 30 |
| 2.6.6 | แบบจำลองการสมดุลย์ของน้ำ (water balance models) ... | 32 |
| 2.6.7 | แบบจำลองพื้นฐานทางชลศาสตร์ (hydraulically based models) | 33 |
| 2.7 | ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา | 36 |
| 2.7.1 | วิธีเรย์เทเนล (Rational method) | 36 |
| 2.7.1.1 | ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่า (runoff coefficient) ... | 36 |
| 2.7.1.2 | ค่าเวลาน้ำหลากสูงสุด (time to peak) | 37 |
| 2.7.2 | ทฤษฎีที่ใช้ในแบบจำลอง SWMM | 37 |
| 2.7.2.1 | ทฤษฎีที่ใช้ใน RUNOFF Block | 48 |
| 2.7.2.2 | ทฤษฎีที่ใช้ใน EXTRAN Block | 57 |
| 2.7.2.2.1 | หลักการคำนวณของระบบขนส่งน้ำ | 58 |
| 2.7.2.2.2 | สมการการไหลพื้นฐาน (basic flow equation) | 60 |
| 2.7.2.2.3 | อาคารควบคุมการไหล | 63 |
| บทที่ 3 | ผลการเก็บข้อมูลภาคสนามของนักศึกษา | |
| 3.1 | สภาพพื้นที่ศึกษา | 71 |
| 3.1.1 | สภาพภูมิประเทศ | 71 |
| 3.1.2 | สภาพการใช้ที่ดิน | 71 |
| 3.1.3 | สภาพธรณีวิทยา | 73 |
| 3.1.4 | สภาพอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยา | 73 |
| 3.1.5 | ระบบระบายน้ำ และการระบายน้ำที่เกี่ยวข้อง | 81 |
| 3.2 | ข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่ศึกษา | 81 |
| 3.2.1 | ข้อมูลพื้นที่รับน้ำ | 83 |
| 3.2.2 | ข้อมูลระบบระบายน้ำ | 83 |
| 3.3 | การติดตั้งเครื่องมือวัดทางอุทกวิทยา | 89 |
| 3.3.1 | เครื่องวัดน้ำฝน | 89 |
| 3.3.2 | เครื่องวัดระดับน้ำ และฝายวัดอัตราการไหล | 89 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3.3.3 เครื่องวัดอัตราการซึม | 91 |
| 3.4 ผลการเก็บข้อมูลทางอุทกวิทยา | 91 |
| 3.4.1 ข้อมูลฝน | 91 |
| 3.4.2 ข้อมูลระดับน้ำและอัตราการไหล | 94 |
| 3.4.3 ข้อมูลอัตราการซึม | 94 |
| บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในสนามและการปรับเทียบแบบจำลอง | |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสนาม | 100 |
| 4.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าอัตราการไหล | 100 |
| 4.1.1.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่า | 100 |
| 4.1.1.2 การวิเคราะห์ค่าเวลาน้ำไหลกลับสูงสุด (time to peak, Tp) | 105 |
| 4.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลอัตราการซึม | 107 |
| 4.2 การปรับเทียบแบบจำลอง (MODEL CALIBRATION) | 113 |
| 4.2.1 ลักษณะและคุณสมบัติทางกายภาพของพื้นที่ทดลอง | 113 |
| 4.2.2 ข้อมูลอุทกวิทยาและชลศาสตร์ในสนามที่ใช้ปรับเทียบแบบจำลอง .. | 119 |
| 4.2.3 วิธีการและขั้นตอนการปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง | 122 |
| 4.2.4 การวิเคราะห์ผลการปรับเทียบและเลือกค่าพารามิเตอร์ | 126 |
| 4.3 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลในสนามและปรับเทียบแบบจำลอง | 136 |
| บทที่ 5 การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการปรับปรุง (ระบบระบายน้ำของพื้นที่ศึกษา) | |
| 5.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาปรับปรุงระบบระบายน้ำ | 145 |
| 5.2 ขั้นตอนการศึกษาปรับปรุงระบบระบายน้ำ | 147 |
| 5.3 การประเมินสภาพระบบระบายน้ำปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา | 149 |
| 5.4 ประสิทธิภาพของการออกแบบแนวทางการปรับปรุงระบบ ระบายน้ำต่าง ๆ | 154 |
| 5.4.1 การติดตั้งเครื่องสูบน้ำ | 157 |
| 5.4.2 กรณีเปลี่ยนความลาดชันและขนาดท่อระบายน้ำ | 157 |
| 5.4.3 กรณีใช้สระเก็บกักน้ำ | 161 |
| 5.5 การศึกษาออกแบบปรับปรุงระบบระบายน้ำของพื้นที่ศึกษา | 165 |
| บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ | |
| 6.1 ผลการเก็บข้อมูลภาคสนาม | 179 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 6.2 ผลการคำนวณเปรียบเทียบ และประยุกต์ใช้แบบจำลอง | 180 |
| 6.3 ผลการประเมินระบบระบายน้ำปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา | 182 |
| 6.4 ผลการปรับปรุงระบบระบายน้ำของพื้นที่ศึกษา | 182 |
| 6.5 สรุปผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWMM | 183 |
| 6.6 ข้อเสนอแนะ | 186 |
| เอกสารอ้างอิง | 188 |
| ภาคผนวก ก ข้อมูลอุทกวิทยาในสนาม | 194 |
| ภาคผนวก ข การทดลองหาค่าคงที่ของฝายวัดอัตราการไหล | 256 |
| ภาคผนวก ค ภาพประกอบในช่วงการศึกษา | 263 |
| ประวัติผู้ศึกษา | 272 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 2-1 | สัมประสิทธิ์การไหล C (Stephenson, 1981) 40 |
| 2-2 | สัมประสิทธิ์การไหล C (used by City of Austin, Texas) 41 |
| 2-3 | สัมประสิทธิ์การไหล C ของ กทม. (CDM, 1968) 41 |
| 2-4 | สัมประสิทธิ์การไหล C (ASCE, 1976) 42 |
| 2-5 | สัมประสิทธิ์การไหล C ของ กทม. (NEDECO, 1985) 42 |
| 2-6 | สูตรการหาค่าเวลาน้ำหลากสูงสุด, T_p 45 |
| 2-7 | คุณสมบัติของ link และ node 58 |
| 2-8 | ค่าของ C_{ratio} และ C_{sub} 68 |
| 3-1 | ลักษณะภูมิอากาศเฉลี่ยในรอบ 30 ปี (2494-2528) 74 |
| 3-2 | คุณสมบัติของพื้นที่รับน้ำย่อย 85 |
| 3-3 | คุณสมบัติของ link ของระบบระบายน้ำของพื้นที่ศึกษา 87 |
| 3-4 | คุณสมบัติของ node ของระบบระบายน้ำของพื้นที่ศึกษา 88 |
| 3-5 | ข้อมูลปริมาณฝนรายวันในช่วงเวลาเก็บข้อมูล 92 |
| 3-6 | เหตุการณ์ฝนและช่วงเวลาที่ตก 93 |
| 3-7 | ข้อมูลปริมาณฝน ค่าระดับน้ำและอัตราการไหลในพื้นที่ทดลอง 96 |
| 3-8 | ผลการทดลองหาค่าอัตราการซึมลงดิน บริเวณสนามหญ้าด้านทิศใต้ของตึก 1 คณะอักษรศาสตร์ 97 |
| 3-9 | ผลการทดลองหาค่าอัตราการซึมลงดิน บริเวณสนามหญ้า ด้านทิศใต้ของหอประชุมกลาง 98 |
| 4-1 | ค่าต่าง ๆ ของเหตุการณ์ฝน 15 เหตุการณ์จากวิธีเรซิ่นเนล 101 |
| 4-2 | ค่าของตัวแปรที่ได้จากวิเคราะห์ทั้ง 15 เหตุการณ์ 102 |
| 4-3 | การคำนวณหาค่า T_p จากสูตร Kinematic และ Izzard 106 |
| 4-4 | สรุปผลการวิเคราะห์หาค่า T_p 107 |
| 4-5 | ค่าอัตราการซึมของพื้นที่ทดลองและค่ามาตรฐาน 111 |
| 4-6 | สรุปคุณสมบัติของพื้นที่รับน้ำย่อยและ link-node 115 |
| 4-7 | ข้อมูลเหตุการณ์ฝนที่ใช้เปรียบเทียบแบบจำลอง 119 |
| 4-8 | ค่าพารามิเตอร์อัตราการซึมลงดินของแต่ละพื้นที่รับน้ำย่อย 120 |
| 4-9 | ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กำหนดให้โดยแบบจำลอง (default parameter) ... 121 |
| 4-10 | ค่าสัมประสิทธิ์แมนนิ่งที่แนะนำในแบบจำลอง SWMM 122 |
| 4-11 | ผลการวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) ของค่าพารามิเตอร์ ... 125 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 4-12 | ผลเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง RUNOFF Block กับค่าวัดจริง 127 |
| 4-13 | เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับค่าวัดจริง 129 |
| 4-14 | สรุปผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของพื้นที่และการเปรียบเทียบแบบจำลองของพื้นที่ศึกษา . 143 |
| 5-1 | เปรียบเทียบผลการประเมินประสิทธิภาพระบบระบายน้ำเดิมของพื้นที่ศึกษา 151 |
| 5-2 | เปรียบเทียบผลการติดตั้งเครื่องสูบน้ำขนาดต่าง ๆ ที่จุดไหลออก 158 |
| 5-3 | เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนท่อระบายน้ำขนาดต่าง ๆ 162 |
| 5-4 | เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนสระเก็บน้ำขนาดต่าง ๆ 166 |
| 5-5 | เปรียบเทียบผลการปรับปรุงระบบระบายน้ำของพื้นที่ศึกษา 169 |
| 5-6 | ความลึกของน้ำท่วมที่โนดและระยะเวลาการท่วมของระบบระบายน้ำปัจจุบัน 170 |
| 5-7 | สรุประบบระบายน้ำที่ทำการปรับปรุงตามแนวทางเลือกที่ 3 171 |
| 5-8 | ผลเปรียบเทียบความลึกและเวลาน้ำท่วม จากระบบเดิมและระบบปรับปรุง 177 |
| 6-1 | สรุปผลค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง 181 |
| 6-2 | เปรียบเทียบวิธีเรซิ่นเนลกับแบบจำลอง SWMM 184 |
| ก-1 | เหตุการณ์ 14-JUL-88 01:13 196 |
| ก-2 | เหตุการณ์ 18-JUL-88 21:33 199 |
| ก-3 | เหตุการณ์ 30-JUL-88 15:45 202 |
| ก-4 | เหตุการณ์ 2-AUG-88 06:02 207 |
| ก-5 | เหตุการณ์ 3-AUG-88 23:24 210 |
| ก-6 | เหตุการณ์ 10-AUG-88 23:10 214 |
| ก-7 | เหตุการณ์ 20-AUG-88 01:15 219 |
| ก-8 | เหตุการณ์ 21-AUG-88 02:00 224 |
| ก-9 | เหตุการณ์ 30-AUG-88 00:18 227 |
| ก-10 | เหตุการณ์ 14-SEP-88 15:02 231 |
| ก-11 | เหตุการณ์ 16-SEP-88 02:30 235 |
| ก-12 | เหตุการณ์ 17-SEP-88 12:00 239 |
| ก-13 | เหตุการณ์ 17-SEP-88 19:30 243 |
| ก-14 | เหตุการณ์ 20-SEP-88 00:00 248 |
| ก-15 | เหตุการณ์ 17-OCT-88 18:08 252 |
| ข-1 | ผลการทดลองหาอัตราการไหลด้วยฝายสันตม 261 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 1-1 | พื้นที่ศึกษา | 4 |
| 1-2 | พื้นที่ทดลอง | 5 |
| 2-1 | ระบบระบายน้ำในเขตเมือง | 12 |
| 2-2 | ระบบย่อยของน้ำท่าผิวดิน | 12 |
| 2-3 | ความสัมพันธ์ระหว่าง การซึมผ่าน-เวลา โดยสมการของฮอร์ดัน | 15 |
| 2-4 | ระบบย่อยของการขนส่งน้ำ | 17 |
| 2-5 | ระบบย่อยของแหล่งรับน้ำ | 17 |
| 2-6 | ระบบระบายน้ำรวม (Kibler et al., 2518)..... | 19 |
| 2-7 | ลักษณะพื้นที่รับน้ำตามแนวความคิดของแบบจำลอง STORM | 22 |
| 2-8 | ผังการทำงานของแบบจำลอง STORM | 22 |
| 2-9 | ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลอง SEMSTORM | 24 |
| 2-10 | วิธีการคำนวณชลภาพน้ำท่าก่อนผ่านการหลากของแบบจำลอง RRL | 26 |
| 2-11 | ผังการทำงานของแบบจำลอง ILLUDAS | 27 |
| 2-12 | โครงสร้างของแบบจำลอง RUNQUAL | 29 |
| 2-13 | ผังการทำงานของแบบจำลอง Urban Wastewater Management Model | 31 |
| 2-14 | ผังการทำงานของแบบจำลอง HSPE | 34 |
| 2-15 | ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่าสำหรับพื้นที่เกษตรกรรม (Horn and Schwab, 1963) | 38 |
| 2-16 | ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่าต่อความชื้นแฉะตามลักษณะภูมิประเทศ | 39 |
| 2-17 | ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น-ช่วงเวลา-ความถี่ ของพื้นที่ช่วงเวลาฝนตก 2 ชั่วโมง | 43 |
| 2-18 | ช่วงเวลาไหลหลากสูงสุด (time to peak, T_p) (Linsley, Kohler and Paulhus, 2501) | 44 |
| 2-19 | โครงสร้างหลักของแบบจำลอง SWMM | 47 |
| 2-20 | โครงสร้างของแบบจำลอง SWMM (แบบจำลอง RUNOFF และ EXTRAN) | 49 |
| 2-21 | หลักการจำลองพื้นที่ระบายน้ำของแบบจำลองน้ำท่าผิวดิน | 50 |
| 2-22 | ผังการคำนวณของ RUNOFF Block | 52 |
| 2-23 | หลักการคำนวณการไหลของน้ำที่ไหลมา ไปตามผิวดินสำหรับพื้นที่รับน้ำย่อย | 53 |
| 2-24 | กราฟค่าอัตราการซึมมาตรฐาน ที่มา : American Society of Civil Engineers Manual of Engineering Practice NO.37, 2503. | 55 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2-25 | หลักการคำนวณปริมาณการไหลของน้ำในทางน้ำ | 56 |
| 2-26 | หลักการจำลอง link-node ของแบบจำลอง EXTRAN | 59 |
| 2-27 | ผังการคำนวณของ EXTRAN Model | 61 |
| 2-28 | หลักการจำลองสภาพของระบบเก็บกักน้ำ (storage junction) | 64 |
| 2-29 | รูปแบบของออริฟิซึ้นน้ำ (orifice diversion) | 65 |
| 2-30 | หลักการจำลองลักษณะฝายผันน้ำ | 67 |
| 2-31 | หลักการจำลองสภาพระบบสูบน้ำ | 69 |
| 3-1 | ค่าระดับของพื้นที่ศึกษา | 72 |
| 3-2 | แผนที่แสดงทิศทางลม และร่องมรสุม ของประเทศไทย | 75 |
| 3-3 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม-ช่วงเวลา-ความถี่ของฝน | 77 |
| 3-4 | รูปแบบฝนออกแบบที่ตกใน 2 ชั่วโมง คาบการกลับ 5 ปี ที่มา : นิตยา 2532 ... | 78 |
| 3-5 | รูปแบบฝนออกแบบที่ตกใน 6 ชั่วโมง คาบการกลับ 5 ปี ที่มา : นิตยา 2532 ... | 79 |
| 3-6 | กราฟฝนออกแบบช่วง เวลาฝนตก 2 ชั่วโมงที่คาบการกลับ 2 ปี และ 5 ปี | 80 |
| 3-7 | ระบบระบายน้ำหลักของพื้นที่ศึกษา | 82 |
| 3-8 | พื้นที่รับน้ำย่อย | 84 |
| 3-9 | ระบบ link-node ของระบบระบายน้ำของพื้นที่ศึกษา | 86 |
| 3-10 | สถานที่ติดตั้งเครื่องมือวัดทางอุทกวิทยา | 90 |
| 3-11 | กราฟปริมาณฝนรายวันของพื้นที่ศึกษา (23 มิ.ย.31 - 8 พ.ย.31) | 95 |
| 3-12 | กราฟอัตราการซึมลงดินบริเวณสนามหญ้าด้านทิศใต้ของตึก 1 คณะอักษรศาสตร์ .. | 97 |
| 3-13 | กราฟอัตราการซึมลงดิน บริเวณสนามหญ้าด้านทิศใต้ของหอประชุมกลาง | 98 |
| 4-1 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มฝนกับค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่า | 101 |
| 4-2 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลออกสูงสุด กับค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่า | 103 |
| 4-3 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มฝนกับค่าอัตราการไหลออกสูงสุด | 103 |
| 4-4 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาน้ำหลากสูงสุดกับความเข้มฝน | 108 |
| 4-5 | กราฟหาค่า n ที่เหมาะสมของสูตร Kinematic | 109 |
| 4-6 | กราฟหาค่า c ที่เหมาะสมของสูตร Izzard | 109 |
| 4-7 | กราฟเปรียบเทียบอัตราการซึมของพื้นที่ทดลองกับค่ามาตรฐาน | 112 |
| 4-8 | ขอบเขตพื้นที่ทดลอง | 114 |
| 4-9 | โครงสร้างจำลองสถานการณ์ไหลหลากตามผิวของพื้นที่รับน้ำ | 116 |
| 4-10 | สมมติฐานความกว้างการไหลตามผิวของพื้นที่รับน้ำย่อยในภาคการศึกษา | 117 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4-11 | หมายเลขพื้นที่รับน้ำย่อย, link, node และทิศทางการไหลของพื้นที่ทดลอง | 118 |
| 4-12 | แผนผังขั้นตอนการเปรียบเทียบแบบจำลอง | 124 |
| 4-13 | เปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลองกับปริมาณน้ำท่าวัดจริง (RUNOFF Block) | 130 |
| 4-14 | เปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าวัดจริงกับอัตราส่วนปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลองกับค่าวัดจริง (RUNOFF Block) | 130 |
| 4-15 | เปรียบเทียบอัตราการไหลสูงสุดจากแบบจำลองกับค่าวัดจริง | 131 |
| 4-16 | เปรียบเทียบอัตราการไหลออกสูงสุดวัดจริงกับอัตราส่วนอัตราการไหลออกสูงสุดจากแบบจำลองกับค่าวัดจริง | 131 |
| 4-17 | เปรียบเทียบเวลาถึงจุดไหลออกสูงสุดจากแบบจำลองกับค่าวัดจริง | 132 |
| 4-18 | เปรียบเทียบเวลาถึงจุดไหลออกสูงสุดวัดจริงกับอัตราส่วนเวลาถึงจุดไหลออกสูงสุดจากแบบจำลองกับค่าวัดจริง | 132 |
| 4-19 | เปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลออกจากแบบจำลองกับค่าวัดจริง | 133 |
| 4-20 | เปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลออกวัดจริง กับอัตราส่วนปริมาณน้ำไหลออกจากแบบจำลองกับค่าวัดจริง | 133 |
| 4-21 | เปรียบเทียบระดับน้ำที่จุดไหลออกจากแบบจำลอง กับค่าวัดจริง | 134 |
| 4-22 | เปรียบเทียบระดับน้ำที่จุดไหลออกวัดจริง กับอัตราส่วน ระดับน้ำที่จุดไหลออกจากแบบจำลองกับค่าวัดจริง | 134 |
| 4-23 | เปรียบเทียบระดับน้ำที่บ่อนัก M1 จากแบบจำลองกับค่าวัดจริง | 135 |
| 4-24 | เปรียบเทียบระดับน้ำที่บ่อนัก M1 วัดจริงกับอัตราส่วนระดับน้ำที่บ่อนัก M1 จากแบบจำลองกับค่าวัดจริง | 135 |
| 4-25 | ผลการเปรียบเทียบ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลวัดจริง เหตุการณ์ 18-JUL-88 | 137 |
| 4-26 | ผลการเปรียบเทียบ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลวัดจริง เหตุการณ์ 16-SEP-88 | 138 |
| 4-27 | ผลการเปรียบเทียบ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลวัดจริง เหตุการณ์ 17-SEP-88 | 139 |
| 4-28 | ผลการตรวจสอบ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลวัดจริง เหตุการณ์ 30-AUG-88 | 140 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4-29 | ผลการตรวจสอบโดยเปรียบเทียบที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลวัดจริง เหตุการณ์ 14-SEP-88 | 141 |
| 5-1 | กราฟระดับน้ำในคลองอรชร จากค่าทำนายเปรียบเทียบกับการศึกษา โดย NEDECO | 146 |
| 5-2 | กราฟความลาดต่ำสุดของท่าระบายน้ำ ขนาดต่าง ๆ | 148 |
| 5-3 | กราฟการเลือกขนาดเครื่องสูบน้ำตามขนาดที่ระบายน้ำที่นำน้ำระบายมา | 148 |
| 5-4 | ตำแหน่ง node ของพื้นที่ศึกษา | 150 |
| 5-5 | เปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่ไนต์ จากผลการประเมินประสิทธิภาพ ระบบระบายน้ำปัจจุบัน | 152 |
| 5-6 | เปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่จุดออก จากผลการประเมินประสิทธิภาพ ระบบระบายน้ำปัจจุบัน | 153 |
| 5-7 | ค่าระดับกันไนต์ | 155 |
| 5-8 | เปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่ไนต์ จากการเปลี่ยนเครื่องสูบน้ำที่จุดไหลออก ขนาดต่าง ๆ | 159 |
| 5-9 | เปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่จุดออก จากการเปลี่ยนเครื่องสูบน้ำ ที่จุดไหลออกขนาดต่าง ๆ | 160 |
| 5-10 | เปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่ไนต์ จากการเปลี่ยนท่อขนาดต่าง ๆ | 163 |
| 5-11 | เปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่จุดไหลออก จากการเปลี่ยนท่อขนาดต่าง ๆ | 164 |
| 5-12 | เปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่ไนต์ จากการเปลี่ยนความจุสระขนาดต่าง ๆ | 167 |
| 5-13 | เปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่จุดไหลออก จากการเปลี่ยนความจุสระ ขนาดต่าง ๆ | 168 |
| 5-14 | เปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่ไนต์จากการปรับปรุงระบบระบายน้ำกับ ระบบระบายน้ำปัจจุบัน ที่คาบการกลับของฝน 2 ปี | 173 |
| 5-15 | เปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่จุดไหลออก จากการปรับปรุง ระบบระบายน้ำปัจจุบัน ที่คาบการกลับของฝน 2 ปี | 174 |
| 5-16 | เปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่ไนต์ จากการปรับปรุงระบบระบายน้ำ กับระบบ ระบายน้ำปัจจุบัน ที่คาบการกลับของฝน 5 ปี | 175 |
| 5-17 | เปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่จุดไหลออก จากการปรับปรุงระบบระบายน้ำ ปัจจุบัน ที่คาบการกลับของฝน 5 ปี | 176 |
| ก-1 | เหตุการณ์ 14-JUL-88 01:13 | 197 |
| ก-2 | เหตุการณ์ 18-JUL-88 21:33 | 200 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| ก-3 | เหตุการณ์ 30-JUL-88 15:45 | 205 |
| ก-4 | เหตุการณ์ 2-AUG-88 06:02 | 208 |
| ก-5 | เหตุการณ์ 3-AUG-88 23:24 | 212 |
| ก-6 | เหตุการณ์ 10-AUG-88 23:10 | 217 |
| ก-7 | เหตุการณ์ 20-AUG-88 01:15 | 222 |
| ก-8 | เหตุการณ์ 21-AUG-88 02:00 | 225 |
| ก-9 | เหตุการณ์ 30-AUG-88 00:18 | 229 |
| ก-10 | เหตุการณ์ 14-SEP-88 15:02 | 233 |
| ก-11 | เหตุการณ์ 16-SEP-88 02:30 | 237 |
| ก-12 | เหตุการณ์ 17-SEP-88 12:00 | 241 |
| ก-13 | เหตุการณ์ 17-SEP-88 19:30 | 246 |
| ก-14 | เหตุการณ์ 20-SEP-88 00:00 | 250 |
| ก-15 | เหตุการณ์ 17-OCT-88 18:08 | 254 |
| ข-1 | ขนาดและรูปร่างฝายสันคมวัดอัตราการไหล | 257 |
| ข-2 | รายละเอียดของรางน้ำเปิดที่ใช้ทดลองฝายวัดอัตราการไหล | 258 |
| ข-3 | การติดตั้งฝายวัดอัตราการไหล | 259 |
| ข-4 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงน้ำ และอัตราการไหลหน่วยเมตริก | 262 |
| ข-5 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงน้ำ และอัตราการไหลหน่วยอังกฤษ | 262 |
| ค-1 | สถานที่ทดลองหาอัตราการซิมบริเวณสนามหญ้าด้านทิศใต้ของตึก 1 คณะอักษรศาสตร์ | 263 |
| ค-2 | สถานที่ทดลองหาอัตราการซิมบริเวณสนามหญ้าด้านทิศใต้ ของหอประชุมกลาง | 263 |
| ค-3 | ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดระดับน้ำที่บ่อนักบริเวณสามแยก ไปหอประชุมกลาง | 264 |
| ค-4 | ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดระดับน้ำที่บ่อนักบริเวณจุดไหลออก | 264 |
| ค-5 | ฝายสันคมวัดอัตราการไหล | 265 |
| ค-6 | รางน้ำเปิดที่ใช้ทดลองหาค่าคงที่ของฝายสันคม | 265 |
| ค-7 | เครื่องสูบน้ำที่ใช้ทดลองหาค่าคงที่ของฝายสันคม | 266 |
| ค-8 | ติดตั้งฝายวัดอัตราการไหลที่บ่อนักจุดไหลออก | 266 |
| ค-9 | เครื่องวัดน้ำฝนอัตโนมัติ | 267 |
| ค-10 | ตำแหน่งติดตั้งถังวัดน้ำฝนภาคฟ้าหน้าตึกภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า | 267 |
| ค-11 | เครื่องมือวัดทางอุทกวิทยาบนเขตฟ้าตึกภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า | 268 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| ค-12 | การสำรวจค่าระดับอุโมงค์อั้งรีตุนังต์ บริเวณประตูคณะรัฐศาสตร์ | 268 |
| ค-13 | ปากอุโมงค์อั้งรีตุนังต์ที่ประตูระบายน้ำอรชร | 269 |
| ค-14 | ประตูระบายน้ำคลองอรชร | 269 |
| ค-15 | น้ำท่วมบริเวณหอประชุมด้านทิศใต้ | 270 |
| ค-16 | น้ำท่วมบริเวณหอประชุมด้านทิศเหนือ | 270 |
| ค-17 | น้ำท่วมเอ่อบริเวณรางระบายหลัก (U-0.45 ม.) ซ้างตัก 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ | 271 |
| ค-18 | น้ำท่วมเอ่อบริเวณรางระบายน้ำหลัก (U-0.45 ม.) ซ้างตัก 1 คณะอักษรศาสตร์ | 271 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย