

การจำลองสภาพน้ำท่วมในพื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนาโดยแบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN

เลิศลักษณ์ คงกะตะ¹ และ นิตยา หวังวงศ์โรจน์^{2*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำงานของระบบระบายน้ำในปัจจุบันสำหรับรองรับปริมาณฝนเนื่องจากเหตุการณ์ฝนตกหนักในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยใช้แบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยหน่วยงาน DHI ประเทศเดนมาร์ก ที่ประกอบด้วยแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Model) แบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลอง (Pipe-Network Model) แบบ 1 มิติ และแบบจำลองการไหลแผ่นผืนผิวดินแบบ 2 มิติ (2D overland flow model) โดยคัดเลือกพื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนาเป็นพื้นที่ศึกษา ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลแบบ 1 มิติ ด้วยข้อมูลฝนราย 15 นาที ช่วงวันที่ 8-16 ตุลาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งมีปริมาณฝนตกสูงสุด 32 มม./ชม. และทำการตรวจพิสูจน์แบบจำลองด้วยข้อมูลฝนราย 15 นาที ช่วงวันที่ 17-24 ตุลาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งมีปริมาณฝนตกสูงสุด 76 มม./ชม. จากนั้นทำการเชื่อมต่อแบบจำลองการไหล 1 มิติเข้ากับแบบจำลอง 2 มิติ เพื่อจำลองสภาพน้ำท่วมแบบ 2 มิติ โดยใช้ข้อมูลแผนที่ระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) ประกอบการคำนวณเพื่อจัดทำแผนที่น้ำท่วม พบว่า มีน้ำท่วมขังในหลายพื้นที่ ระดับน้ำท่วมสูงสุด 0.45 ม. และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่น้ำท่วมด้วยการจำลองสภาพน้ำท่วมจากเหตุการณ์ฝนตกหนักในวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2558 ซึ่งมีปริมาณฝนตกสูงสุด 88 มม./ชม. พบว่า มีระดับน้ำท่วมขัง 0.05 ถึง 0.45 ม. ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลสภาพน้ำท่วมจริงในพื้นที่ศึกษา

คำสำคัญ : การจำลองสภาพน้ำท่วม / แบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN / พื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนา / ระบบระบายน้ำ

* Corresponding Author : nittaya.wan@kmutt.ac.th

¹ นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

FLOOD SIMULATION IN KLONGTOEY-WATTHANA POLDER USING MIKE FLOOD URBAN MODEL

Loetlak Khongkadae¹ and Nittaya Wangwongwiroj^{2*}

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Tungkru, Bangkok 10140

Abstract

This study aimed to investigate the capacity of a drainage system in accommodating heavy rainfall in the Bangkok area. The MIKE FLOOD URBAN model, developed by DHI, was used in the study. The model consists of the rainfall-runoff model, 1-dimensional pipe-network model and 2-dimensional overland flow model. The KhlongToey-Watthana polder was selected as the studied area. Model calibration was done using rainfall data at every 15-minute interval from the 8th through 16th of October 2013, with a maximum rainfall intensity of 32 mm per hour. Subsequently, model verification was performed using rainfall data at every 15-minute interval from the 17th through 24th of October 2013 with a maximum rainfall intensity of 76 mm per hour. Then the 1-dimensional and 2-dimensional models were combined to simulate 2-dimensional flood inundation via the use of a Digital Elevation Model (DEM) as an input to generate a flood map. The flood map indicated that many areas were flooded, with a maximum flood depth of 0.45 m. The accuracy of the flood map was verified against the simulated flood data during the heavy rainfall event on the 24th of March 2015, which had a maximum rainfall intensity of 88 mm per hour. Results indicated that the area was flooded from 0.05 to 0.45 m, which agreed well with the actual flood data in the studied area.

Keywords : Flood Simulation / MIKE FLOOD URBAN model / KhlongToey-Watthana Polder / Drainage System

* Corresponding Author : nittaya.wan@kmutt.ac.th

¹ Graduate Student, Water Resources Engineering Division, Civil Engineering Department.

² Associate Professor, Water Resources Engineering Division, Civil Engineering Department.

1. บทนำ

พื้นที่ปีดลอมคลองเตยวัฒนาเป็นหนึ่งใน 24 พื้นที่น้ำท่วมของกรุงเทพมหานคร ซึ่งมักประสบปัญหาน้ำท่วมขังในพื้นที่เนื่องจากเหตุการณ์ฝนตกหนัก ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตและสภาพการจราจรเป็นอย่างมาก [1] พื้นที่นี้มีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่นและเป็นศูนย์กลางด้านเศรษฐกิจที่สำคัญของกรุงเทพมหานคร ดังนั้น จึงควรมีการศึกษาสภาพระบบระบายน้ำและประเมินสภาพน้ำท่วมโดยใช้แบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN ซึ่งเป็นแบบจำลองสภาพการไหลของระบบระบายน้ำในเขตเมืองประกอบด้วยแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Model) แบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลอง (Pipe-Network Model) แบบ 1 มิติ และแบบจำลองการไหลแผ่นบนผิวดินแบบ 2 มิติ (2D Overland Flow) ซึ่งสามารถจำลองระดับน้ำที่ล้นจากบ่อพักและไหลแผ่นบนผิวดินเพื่อจัดทำแผนที่น้ำท่วมได้

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของการศึกษาคั้งนี้คือเพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN สำหรับการจำลองสภาพการไหลในพื้นที่ปีดลอมคลองเตยวัฒนา และจัดทำแผนที่น้ำท่วมเพื่อประเมินสถานการณ์น้ำท่วมเนื่องจากเหตุการณ์ฝนตกหนักช่วงวันที่ 8-24 ตุลาคม พ.ศ. 2556 แล้วทำการตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่น้ำท่วมด้วยข้อมูลสภาพน้ำท่วมจริงในพื้นที่ศึกษาจากเหตุการณ์ฝนตกหนักในวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2558

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jianpininitun [2] ได้ศึกษาการประเมินประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำทุติยภูมิด้วยแบบจำลอง MOUSE พื้นที่ฝั่งตะวันออกของถนนพญาไท โดยใช้ข้อมูลระบบระบายน้ำปัจจุบัน เพื่อนำไปใช้ในการจำลองสภาพของระบบระบายน้ำ จากนั้นทำการหาค่าพารามิเตอร์เฉพาะถิ่นของแบบจำลอง และประเมินทางเลือกที่นำมาปรับปรุงระบบระบายน้ำในพื้นที่ จากการศึกษาพบว่าระบบระบายน้ำในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของถนนพญาไทสามารถระบายน้ำฝนที่มีความลึกฝนรวม 40 มิลลิเมตร ในช่วงเวลา

ฝนตก 2 ชั่วโมงได้อย่างปลอดภัย และพื้นที่ฝั่งตะวันตกของถนนพญาไทสามารถระบายน้ำฝนที่มีความลึกฝนรวม 30 มิลลิเมตร ในช่วงเวลาฝนตก 2 ชั่วโมงได้อย่างปลอดภัย แต่หากฝนที่ตกมีความเข้มฝนสูงกว่าค่านี้จะทำให้เกิดน้ำท่วมในพื้นที่ จะต้องปรับปรุงระบบระบายน้ำเดิมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Mark et al. [3] ได้ศึกษาการจำลองน้ำท่วมในพื้นที่สุขุมวิท กรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ. 2545 โดยใช้แบบจำลอง MOUSE โดยจำลองสภาพน้ำท่วมเป็น 3 กรณี คือ 1) เมื่อแบบจำลองเชื่อมต่อระหว่างน้ำในระบบท่อและปริมาณน้ำล้นจากท่อโดยจำลองการไหลแบบ 1 มิติ 2) การจำลองการไหลที่มีการแยกชั้นของข้อมูลระบบท่อและข้อมูลถนนสำหรับการไหลแบบ 1 มิติ และ 3) จำลองสภาพการไหลโดยใช้ DEM ที่เชื่อมต่อกับระบบท่อ ผลการศึกษาพบว่าในกรณีที่ 3 มีความแม่นยำในการทำนายน้ำท่วมมากที่สุด ส่วนกรณีที่ 1 เหมาะสมสำหรับกรณีที่ฝนเบาบาง และกรณีที่ 2 เหมาะสมสำหรับกรณีที่ฝนปานกลางและมีการควบคุมเวลาฝนตก

Patro et al. [4] ได้จำลองสภาพน้ำท่วมในพื้นที่สามเหลี่ยมปากแม่น้ำมณฑล ประเทศอินเดีย โดยใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ฟราน 1 มิติ และ 2 มิติ MIKE FLOOD ในเบื้องต้นได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลในลำน้ำแบบ 1 มิติ MIKE 11 โดยใช้ข้อมูลระดับน้ำและปริมาณการไหลในช่วงมรสุม (เดือนมิถุนายน ถึง ตุลาคม) พ.ศ. 2545 และทำการตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้ข้อมูลระดับน้ำและปริมาณการไหลในช่วงเวลาเดียวกันของปี พ.ศ. 2544 จากนั้นทำการเชื่อมต่อแบบจำลองการไหลใน 1 มิติ เข้ากับแบบจำลองการไหลแผ่นบนผิวดินแบบ 2 มิติ MIKE21 โดยใช้ข้อมูล SRTM DEM ขนาด 90 เมตร ผลการจำลองได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับภาพถ่ายพื้นที่น้ำท่วมจากดาวเทียม IRS-ID WiFS

Naksua [5] ได้ทำการศึกษารับปรุงระบบระบายน้ำและการทำงานของระบบระบายน้ำหลักในพื้นที่เขตราชบุรีบูรณะ และเขตทุ่งครุ ซึ่งมักประสบกับปัญหาน้ำท่วมขังในช่วงที่ระดับน้ำทะเลหนุนสูง โดยใช้แบบจำลอง MOUSE ประเมินประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำด้วยปริมาณฝนที่รอบปีการเกิดซ้ำ 5 ปี และช่วงเวลากการตก

ของฝน 6 ชั่วโมง ทำการสังเคราะห์ปริมาณฝนด้วยวิธี Chicago เพื่อนำเข้าข้อมูลฝนสู่แบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่า ระบบคลองในพื้นที่ไม่สามารถรองรับปริมาณน้ำได้ทั้งหมด จึงเสนอแนวทางปรับปรุงระบบระบายน้ำเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Gilles et al. [6] ได้ทำการวิจัยและการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับปัญหาน้ำท่วมรัฐไอโอวา (Iowa) ซึ่งตั้งอยู่ในภาคตะวันตกของประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นพื้นที่ซึ่งประสบปัญหาอุทกภัยเพิ่มมากขึ้นในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ภายใต้หน่วยงาน Iowa Flood Center โดยการจัดทำแผนที่น้ำท่วมที่เข้าถึงได้ง่าย และใช้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูง (DEM ขนาด 1 เมตร) การดำเนินการวิจัยประกอบด้วย 1) การจำลองสภาพพื้นที่ราบน้ำท่วมถึง โดยใช้แบบจำลองการไหลใน 1 มิติ HEC-RAS และ HEC-GeoRAS ซึ่งช่วยในการประเมินความเสี่ยงการเกิดอุทกภัย การควบคุมพื้นที่ราบน้ำท่วมถึงและการมีส่วนร่วมในโครงการประกันภัยน้ำท่วมแห่งชาติ และ 2) การจำลองสภาพน้ำท่วมในพื้นที่เขตเมืองอย่างละเอียด โดยใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ผลาน 1 มิติ และ 2 มิติ MIKE FLOOD เพื่อจัดทำคลังแผนที่น้ำท่วม ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการเตือนภัยน้ำท่วม

Seyoum et al. [7] ได้ทำการจำลองน้ำท่วมในเขตเมือง โดยใช้แบบจำลอง SWMM5 ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองการไหลในท่อแบบ 1 มิติ โดยใช้สมการของ Saint-Venant และแบบจำลองการไหลแผ่นผิวดินแบบ

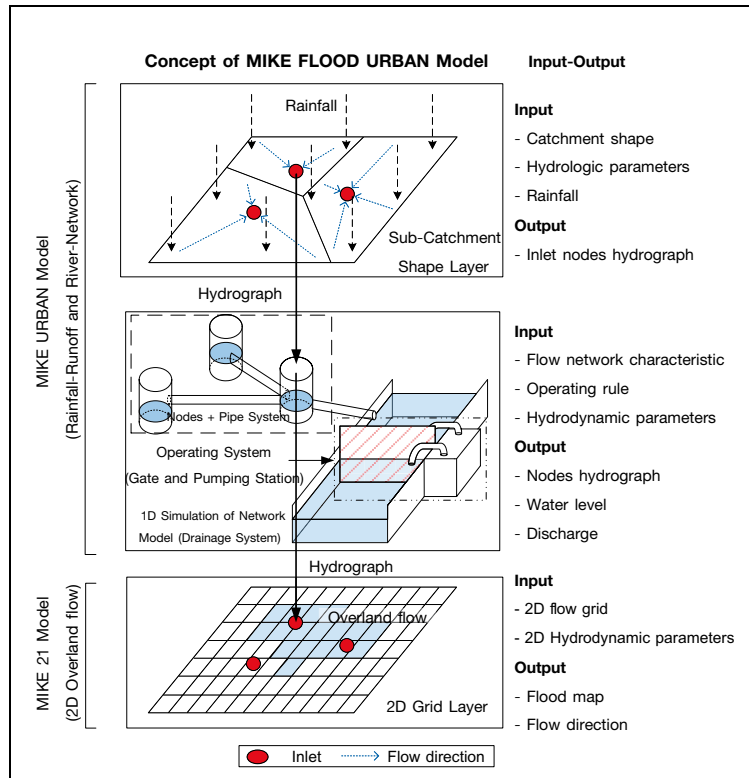
2 มิติ โดยใช้สมการของ Navier-Stokes ในพื้นที่สุขุมวิท กรุงเทพมหานคร ผลจากการจำลองปรากฏว่าเหตุการณ์ฝนตกหนักในวันที่ 1 ตุลาคม ปี พ.ศ. 2541 ทำให้เกิดน้ำท่วมขังในพื้นที่ ประมาณ 45-65 เซนติเมตร แนวถนนสุขุมวิทตลอดสาย

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาสำหรับการจำลองสภาพน้ำท่วมในเขตเมืองพบว่าแบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN ให้ผลการคำนวณที่เหมาะสม ประกอบกับงานวิจัยที่แนะนำให้ใช้การคำนวณผลาน 1 มิติ และ 2 มิติ ในการจำลองพื้นที่น้ำท่วม ซึ่งพบว่าให้ผลดีกว่าการจำลองแบบ 1 มิติ เพียงอย่างเดียว การศึกษานี้จึงเลือกใช้แบบจำลองผลาน 1 มิติ และ 2 มิติ MIKE FLOOD URBAN เพื่อศึกษาระบบระบายน้ำหลักและจำลองสภาพน้ำท่วมในพื้นที่กรุงเทพมหานคร เนื่องจากเหตุการณ์ฝนตกหนัก

4. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการศึกษา

4.1 แบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN

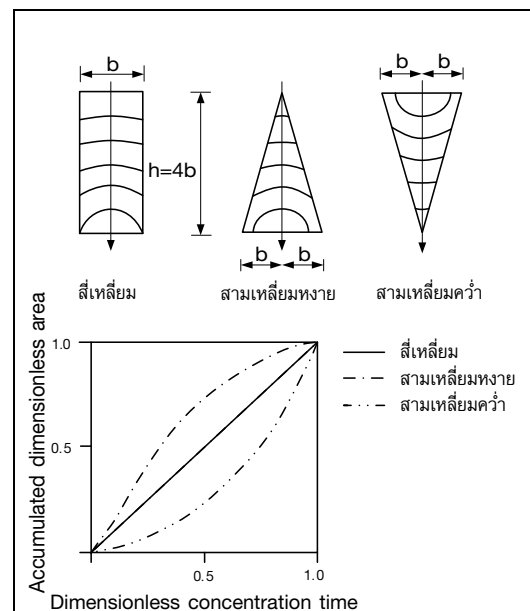
แบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN ประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย คือ แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Model) แบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลอง (Pipe-Network Model) แบบ 1 มิติ และแบบจำลองการไหลแผ่นผิวดินแบบ 2 มิติ (2D Overland Flow) โดยมีหลักการทำงานของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 1 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 หลักการทำงานของแบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN [8]

4.1.1 แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Model)

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประกอบด้วย การคำนวณ 4 วิธี คือ วิธีเวลา/พื้นที่ (Time/Area) วิธี Non-linear Reservoir (Kinematic Wave) วิธี Linear Reservoir และ วิธี Unit Hydrograph สำหรับการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้วิธีเวลา/พื้นที่ (Time/Area Method) ในการคำนวณ โดยใช้ค่าการสูญเสียเริ่มต้นและเส้นโค้งความสัมพันธ์ของเวลา/พื้นที่ โดยแบบจำลองกำหนดพื้นที่รับน้ำเป็น 3 รูปแบบ คือ สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยมหงาย และสามเหลี่ยมคว่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2 [9] ซึ่งรูปร่างของพื้นที่รับน้ำจะมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการไหลรวมตัว (Time of Concentration, T_c) ซึ่งหมายถึง เวลาที่น้ำไหลจากจุดที่ไกลที่สุดของพื้นที่รับน้ำมาถึงจุดที่กำหนดหรือจุดทางออกของน้ำ



รูปที่ 2 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของเวลา/พื้นที่

4.1.2 แบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลอง (Pipe-Network Model)

การคำนวณการไหลของแบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลองสามารถคำนวณได้ทั้งการไหลภายใต้ความดันและการไหลในทางน้ำเปิด อาศัยหลักการของการไหลแบบไม่คงที่ (Unsteady flow) โดยใช้สมการของ Saint-Venant แบบ 1 มิติ ประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัม (Continuity and Momentum Equations) ดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยสมมุติฐานของแบบจำลอง คือ เป็นการไหลของน้ำที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible) และมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) โดยท้องน้ำมีความลาดชันน้อยมากเกือบเป็นการไหลในแนวราบ และความยาวคลื่นมีค่ามากเมื่อเทียบกับความลึกของน้ำ (เส้นการไหลของน้ำขนานกับท้องน้ำ) จึงสามารถตัดความเร่งในแนวดิ่งได้ และความดันมีการกระจายตัวทุกทิศทางสามารถคำนวณสภาวะการไหลเหนือวิกฤติ (Super critical) และใต้วิกฤติ (Sub-Critical) ด้วยกระบวนการเชิงตัวเลขเดียวกัน [9]

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) + gA I_f = gA I_0 \quad (2)$$

เมื่อ

Q คือ อัตราไหล (m^3/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล (m^2)

y คือ ความลึกการไหล (m)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

x คือ ระยะทางตามทิศทางการไหลในแนวราบ (m)

I_0 คือ ความลาดชันของพื้นท้องน้ำ

I_f คือ ความลาดชันของแรงเสียดทาน

α คือ สัมประสิทธิ์การกระจายความเร็ว

t คือ ช่วงเวลาสำหรับการไหลของน้ำ (s)

4.1.3 แบบจำลองการไหลแผ่นบนผิวดินแบบ 2 มิติ (2D Overland Flow Model)

แบบจำลองการไหล 2 มิติ MIKE 21 เป็นแบบจำลองที่คำนวณการไหลแผ่นบนผิวดินที่เชื่อมต่อกับแบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลองเพื่อวิเคราะห์การไหลของน้ำที่ไหลล้นจากบ่อพักแล้วไหลแผ่นบนผิวดิน ข้อมูลที่สำคัญในการจำลองการไหลแผ่นบนผิวดินแบบ 2 มิติ คือ แผนที่ระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) ซึ่งมีลักษณะเป็นกริดสี่เหลี่ยมจัตุรัสย่อยๆ แต่ละกริดประกอบด้วย ข้อมูลระดับความสูงเพียงหนึ่งค่าเท่านั้น โดยการเชื่อมต่อระหว่างแบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลองกับแบบจำลองการไหลแผ่นบนผิวดินแบบ 2 มิติ จะเชื่อมต่อกันโดยปริมาณน้ำล้นออกจากกริดที่คำนวณได้จากแบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลอง สมการควบคุมสำหรับการคำนวณการไหลแผ่นบนผิวดินคือ ชุดสมการของ Saint-Venant แบบ 2 มิติ ซึ่งประกอบด้วยสมการความต่อเนื่องแบบ 2 มิติ และสมการโมเมนตัมแบบ 2 มิติ ดังสมการที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ [9]

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_x^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p_x p_y}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ + \frac{gp_x \sqrt{p_x^2 p_y^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] \end{aligned}$$

$$-\Omega_q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial(p_a)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p_y^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_x p_y}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ + \frac{gp_y \sqrt{p_x^2 p_y^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial x} \right] \end{aligned}$$

$$+\Omega_q - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial(p_a)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

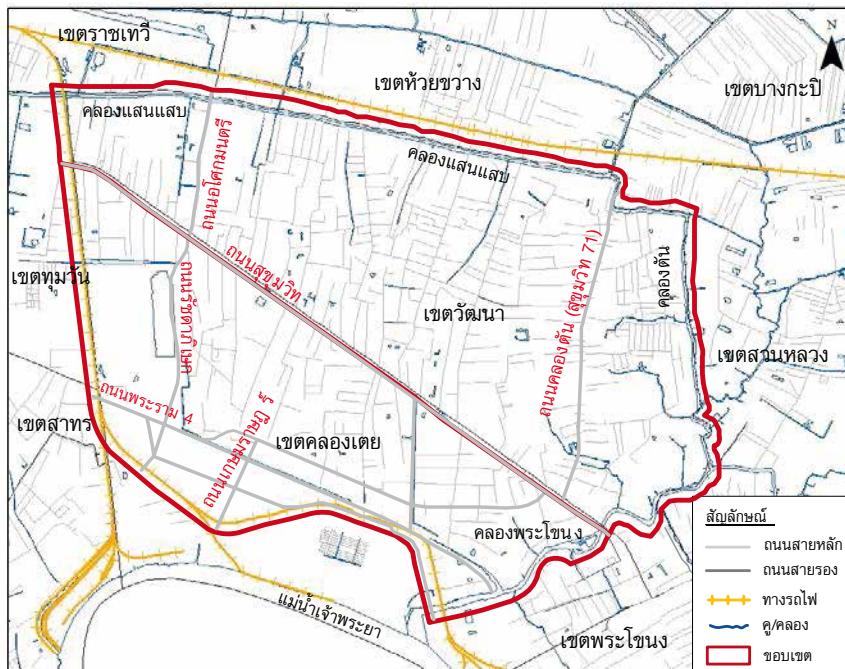
เมื่อ

- h คือ ความลึกน้ำ (m)
 d คือ ความลึกน้ำที่แปรผันตามเวลา (m)
 ζ คือ ระดับผิวน้ำเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง (m)
 p_x คือ ความหนาแน่นของการไหลในทิศทางแกน x (m^3/s)
 p_y คือ ความหนาแน่นของการไหลในทิศทางแกน y (m^3/s)
 C คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระท้องน้ำของ Chezy
 fV คือ ความฝืดเนื่องมาจากลม
 p_a คือ ความดันอากาศ (kg/ms^2)
 p_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
 Ω คือ สัมประสิทธิ์คอริออลิส (s^{-1})
 V_x, V_y คือ ความเร็วลมในทิศทางแกน x, y (m/s)

τ_{xx}, τ_{yy} , คือ แรงเฉือนประสิทธิผลใน
 ทิศทางแกน x, y

4.2 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนามีลักษณะเป็นที่ราบลุ่ม ประกอบด้วยพื้นที่เขตคลองเตยและเขตวัฒนามีพื้นที่รวม 20.00 ตร.กม. มีถนนสุขุมวิทเป็นเส้นแบ่งเขต ทิศเหนือติดกับเขตราษฎร์เทพและเขตห้วยขวาง มีคลองแสนแสบเป็นเส้นแบ่งเขต ทิศตะวันออกติดกับเขตสวนหลวง มีคลองตันและคลองพระโขนงเป็นเส้นแบ่งเขต ทิศใต้ติดกับแม่น้ำเจ้าพระยา และทิศตะวันตกติดกับเขตสาทรและเขตปทุมวัน มีแนวเขตทางรถไฟสายแม่น้ำเป็นเส้นแบ่งเขต ดังแสดงในรูปที่ 3



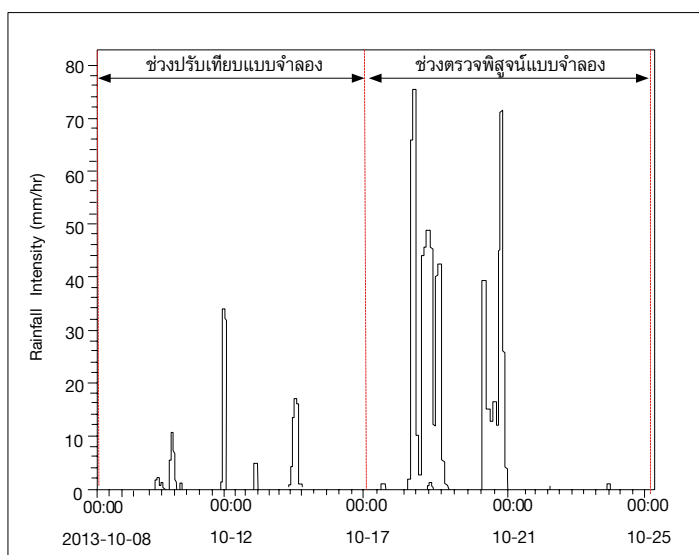
รูปที่ 3 พื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนา

4.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN

การประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN ประกอบด้วย การจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Simulation) การจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลอง (Pipe-Network Simulation) แบบ 1 มิติ ด้วยแบบจำลอง MIKE URBAN การเปรียบเทียบแบบจำลอง และการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Calibration and Verification) และการจำลองการไหลแผ่นผืนผิวดินแบบ 2 มิติ (2D Overland Flow Simulation) ด้วยแบบจำลอง MIKE 21 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 การจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Simulation)

การจำลองน้ำฝน-น้ำท่าจะใช้ข้อมูลฝนราย 15 นาที ช่วงวันที่ 8-24 ตุลาคม พ.ศ. 2556 จากสถานีวัดฝนในพื้นที่และบริเวณใกล้เคียงพื้นที่มากที่สุดป้อนเข้าสู่แบบจำลอง เพื่อคำนวณหาปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่บ่อพักแต่ละจุดของพื้นที่รับน้ำย่อย ก่อนจะนำเข้าสู่แบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลองแบบ 1 มิติ ต่อไป ตัวอย่างข้อมูลปริมาณฝนราย 15 นาที ของสถานีตรวจวัดฝนเบญจสิริ (E40) ช่วงวันที่ 8-24 ตุลาคม พ.ศ. 2556 แสดงดังรูปที่ 4

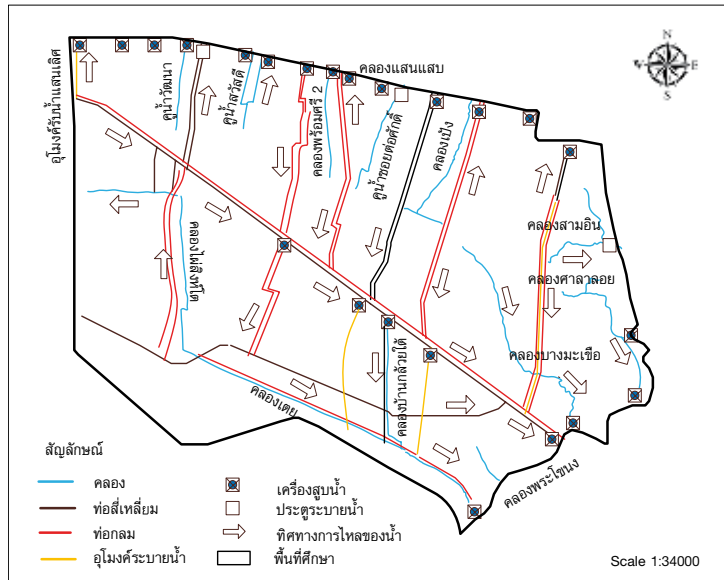


รูปที่ 4 ข้อมูลปริมาณฝนราย 15 นาที สถานีตรวจวัดฝนเบญจสิริ (E40) วันที่ 8-24 ตุลาคม พ.ศ.2556

4.3.2 การจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลอง (Pipe-Network Simulation)

การจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลองจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของระบบระบายน้ำในพื้นที่ เช่น เครื่องสูบน้ำ และบานประตูระบายน้ำ โดยใช้ระดับน้ำในคลอง และการทำงานของเครื่องสูบน้ำเป็นข้อมูลในการ

ป้อนเข้าแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองนี้จะแสดงผลของระดับน้ำในบ่อพักและหน้าตัดของการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลอง ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสู่แบบจำลองการไหลแผ่นผืนผิวดินแบบ 2 มิติต่อไป ลักษณะทางกายภาพของระบบระบายน้ำในพื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนา ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของระบบระบายน้ำ

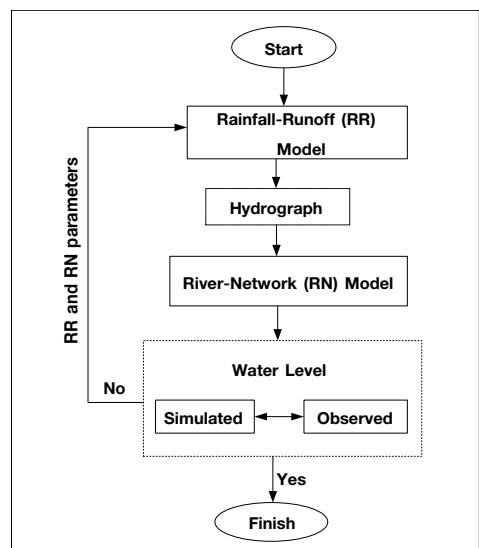
4.3.3 การปรับเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Calibration and Verification)

การปรับเทียบแบบจำลอง จะใช้ข้อมูลฝนราย 15 นาที ช่วงวันที่ 8-16 ตุลาคม พ.ศ. 2556 และทำการตรวจพิสูจน์แบบจำลองด้วยชุดข้อมูลน้ำฝนราย 15 นาที ช่วงวันที่ 17-24 ตุลาคม พ.ศ. 2556 โดยทำการปรับเทียบระดับน้ำในคลองสายย่อยในพื้นที่จำนวน 11 คลอง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับแบบจำลอง คือ ระยะเวลาการไหลรวมตัวของแต่ละลุ่มน้ำย่อย สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งในท่อและคลอง สัมประสิทธิ์ปรับลดปริมาณน้ำท่าและสัมประสิทธิ์รูปร่างพื้นที่รับน้ำ

ในขั้นตอนการปรับเทียบแบบจำลองจะทำการปรับเทียบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า และแบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลองควบคู่กัน โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งในคลองเป็นค่าคงที่ แล้วทำการปรับพารามิเตอร์ในแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าครั้งละ 1 พารามิเตอร์จนกระทั่งระดับน้ำในคลองที่ได้จากการสำรวจ (observed) และระดับน้ำในคลองที่ได้จากแบบจำลอง (simulated) มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งในคลองสายย่อย กำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งของคลองสายหลัก 2 คลอง คือ

คลองแสนแสบและคลองพระโขนง จากการศึกษาการจำลองระบบระบายน้ำปฐมภูมิในพื้นที่ด้านตะวันออกของกรุงเทพมหานคร โดยใช้เหตุการณ์น้ำท่วมปี 2554 [10] เพื่อลดจำนวนตัวแปรในการปรับเทียบแบบจำลอง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งของคลองแสนแสบและคลองพระโขนงเท่ากับ 0.030 และ 0.036 ตามลำดับ กระบวนการปรับเทียบแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กระบวนการปรับเทียบแบบจำลอง

4.3.4 การจำลองการไหลแผ่นผืนผิวดิน (2D Overland Flow Simulation)

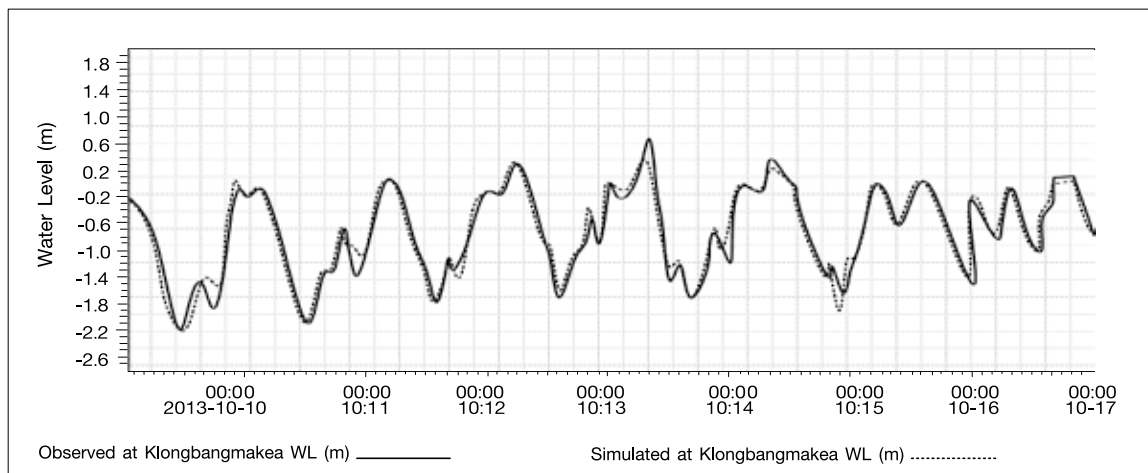
การจำลองการไหลแผ่นผืนผิวดินแบบ 2 มิติ ด้วยแบบจำลอง MIKE 21 ใช้ชั้นข้อมูลแผนที่ระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) ขนาด 90x90 เมตร [11] ของพื้นที่ศึกษาคำนวณค่าระดับของกริดเพื่อสร้างกริดตามระดับความสูงของพื้นที่ แล้วนำระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลองแบบ 1 มิติ เป็นปริมาณน้ำต้นทุนสำหรับแบบจำลอง 2 มิติ คำนวณพื้นที่น้ำท่วมโดยใช้ข้อมูล DEM ประกอบการคำนวณ เพื่อจัดทำแผนที่น้ำท่วม ซึ่งสามารถแสดงผลระดับน้ำที่ท่วมเหนือผิวดินได้อย่างชัดเจน

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง

จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง ด้วยข้อมูลฝนราย 15 นาที ช่วงวันที่ 8-16 ตุลาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งมีปริมาณฝนตกสูงสุด 32 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่า คลองสายย่อย

ซึ่งประกอบด้วย คลองชุด ได้แก่ คูน้ำวัฒนา คูน้ำสวัสดิ์ คลองพร้อมศรี คูน้ำข่อยต่อศักดิ์ คลองบ้านกล้วยใต้ และอุโมงค์แสนเลิศ มีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงอยู่ในช่วง 0.021 ถึง 0.029 และคลองธรรมชาติ ได้แก่ คลองบางมะเขือ คลองเป้ง คลองสามอิน คลองศาลาลอย และคลองเตย สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงอยู่ในช่วง 0.024 ถึง 0.035 ดังแสดงในตารางที่ 1 และเมื่อเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงสำหรับทางน้ำเปิดของ ASCE [12] สำหรับคลองชุด (Earth, straight and uniform) อยู่ในช่วง 0.020 ถึง 0.030 ส่วนคลองธรรมชาติ (Fairly regular section) อยู่ในช่วง 0.030 ถึง 0.070 ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ส่วนใหญ่เป็นไปตามมาตรฐานสำหรับทางน้ำเปิดของ ASCE แต่มีคลองสายย่อย 2 คลอง คือ คลองเป้งและคลองสามอิน ที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบระดับน้ำของคลองบางมะเขือ แสดงดังรูปที่ 7 และค่าพารามิเตอร์อื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองของระดับน้ำในคลองบางมะเขือช่วงวันที่ 8-16 ตุลาคม พ.ศ. 2556

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งของคลองขุด และคลองธรรมชาติ

คลอง/คูน้ำ	สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง
คูน้ำวัฒนา	0.025
คูน้ำสวัสดิ์	0.021
คลองพร้อมศรี	0.026
คูน้ำข่อยต่อศักดิ์	0.023
คลองบ้านกล้วยใต้	0.029
อุโมงค์แสนเลิศ	0.027
คลองบางมะเขือ	0.033
คลองเป้ง	0.024
คลองสามอิน	0.028
คลองศาลาลอย	0.030
คลองเตย	0.035

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบแบบจำลอง

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ระยะเวลาการไหลรวมตัวของแต่ละลุ่มน้ำย่อย	13 – 22 นาที
สัมประสิทธิ์ความขรุขระผิวของแมนนิ่งในท่อ	0.015-0.035
สัมประสิทธิ์ปรับลดปริมาณน้ำท่า	0.5-0.75
สัมประสิทธิ์รูปร่างพื้นที่รับน้ำ	1

ตัวเลขสถิติที่ใช้ในการชี้วัดศักยภาพของการปรับเทียบแบบจำลองตัวแรก คือ ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของปริมาณน้ำ (Volume error, %) เป็นการคำนวณโดย

พิจารณาอัตราการไหลจากการตรวจวัดและอัตราการไหลที่คำนวณได้จากแบบจำลองในช่วงเวลาต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ 6

$$\text{Volume error} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_{obs,i} - Q_{sim,i}}{Q_{obs,i}} \right) \times 100 \% \quad (6)$$

เมื่อ

$Q_{obs,i}$ คือ อัตราการไหลจากการตรวจวัดในช่วงเวลา i (m^3/s)

$Q_{sim,i}$ คือ อัตราการไหลจากแบบจำลองในช่วงเวลา i (m^3/s)

ตัวเลขสถิติที่ใช้ในการชี้วัดศักยภาพของการปรับเทียบแบบจำลองอีก 2 ค่า ที่พิจารณาคือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่า Root Mean Square Error (RMSE) ซึ่งพิจารณาค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัดระดับน้ำในคลองต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ 7 และ 8 ตามลำดับ ตัวเลขสถิติที่ใช้ในการชี้วัดศักยภาพของแบบจำลองแสดงในตารางที่ 3

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (WL_{obs,i} - WL_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (WL_{obs,i} - \overline{WL_{obs}})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(WL_{obs,i} - WL_{sim,i})^2}{N}} \quad (8)$$

เมื่อ

$WL_{obs,i}$ คือ ระดับน้ำในคลองจากการตรวจวัดในช่วงเวลา i (m)

$WL_{sim,i}$ คือ ระดับน้ำในคลองจากแบบจำลองในช่วงเวลา i (m)

$\overline{WL_{obs}}$ คือ ค่าเฉลี่ยของระดับน้ำในคลองจากการตรวจวัด (m)

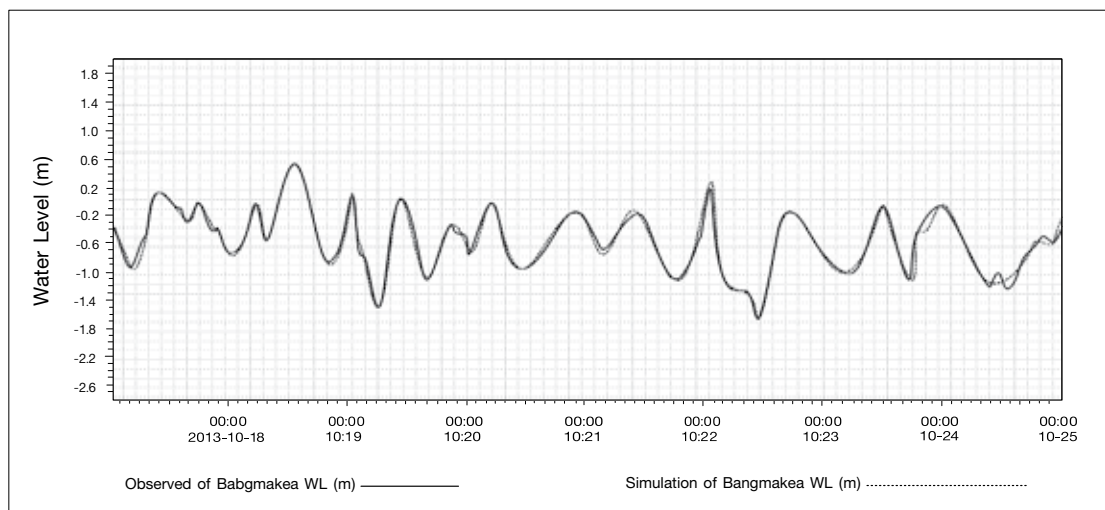
N คือ จำนวนข้อมูลที่พิจารณา

ตารางที่ 3 ตัวเลขสถิติในการชี้วัดศักยภาพของแบบจำลอง

คลอง	Volume error (%)	R ²	RMSE (m)
คูน้ำวัฒนา	1.223	0.851	0.867
คูน้ำสวัสดิ์	2.855	0.889	0.757
คลองพร้อมศรี	0.812	0.964	0.914
คูน้ำข่อยตอศักดิ์	1.025	0.964	0.913
คลองบ้านกล้วยใต้	2.536	0.955	0.894
อุโมงค์แสนเลิศ	4.280	0.955	0.893
คลองบางมะเขือ	1.201	0.976	0.941
คลองเป้ง	5.251	0.896	0.770
คลองสามอิน	1.620	0.925	0.828
คลองศาลาลอย	1.025	0.929	0.837
คลองเตย	2.152	0.952	0.886

5.2 ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

จากการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ด้วยข้อมูลฝน ราย 15 นาที ช่วงวันที่ 17-24 ตุลาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งมีปริมาณฝนตกสูงสุด 76 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และข้อมูลตรวจวัดค่าระดับน้ำในคลองทุกสายในพื้นที่ปิดล้อม คลองเตยวัฒนา ซึ่งมีระดับน้ำในคลอง -1.8 ถึง +2.0 เมตร รทก. ผลการเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำจากการตรวจวัดจริงและข้อมูลจากแบบจำลองในคลองสายย่อย 11 สาย พบว่า เส้นโค้งระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดจริงมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงตัวอย่าง ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองของระดับน้ำในคลองบางมะเขือ ดังแสดงในรูปที่ 8 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของปริมาณน้ำ ที่ได้จากขั้นตอนการตรวจพิสูจน์แบบจำลองมีค่าระหว่าง 0.812 ถึง 5.251 % ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ มีค่า 0.851 ถึง 0.976 และ RMSE มีค่า 0.757 เมตร ถึง 0.941 เมตร แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการจำลองสภาพระบบระบายน้ำในพื้นที่อื่นๆ ได้



รูปที่ 8 ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองของระดับน้ำในคลองบางมะเขือ ช่วงวันที่ 17-24 ตุลาคม พ.ศ. 2556

5.3 ผลการศึกษาแบบจำลองการไหลแผ่นผืนดิน

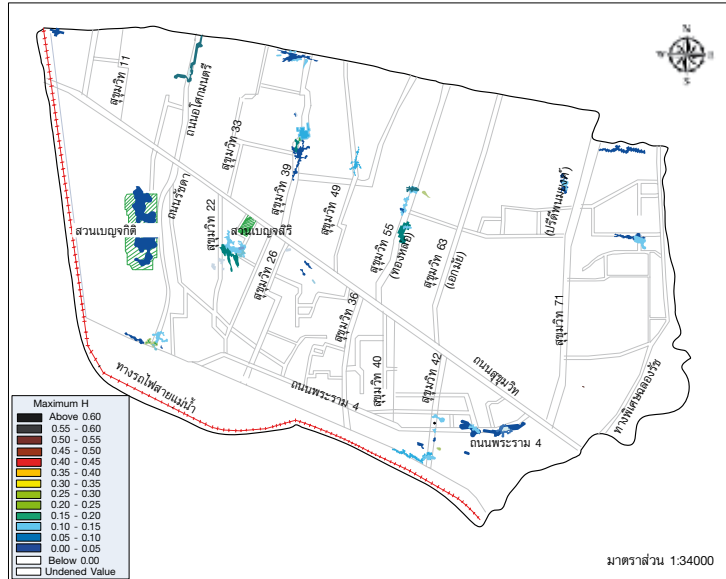
จากการเปรียบเทียบแบบจำลองด้วยชุดข้อมูลฝน ราย 15 นาที ช่วงวันที่ 8-16 ตุลาคม พ.ศ.2556 มีปริมาณฝนสูงสุด 32 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เมื่อนำผลของ

แบบจำลองการไหลในระบบโครงข่ายท่อและคลองแบบ 1 มิติ เชื่อมต่อกับผลของแบบจำลองการไหลแผ่นผืนผิวดินแบบ 2 มิติด้วยชั้นข้อมูลแผนที่ระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) ในระบบอ้างอิงพื้นที่

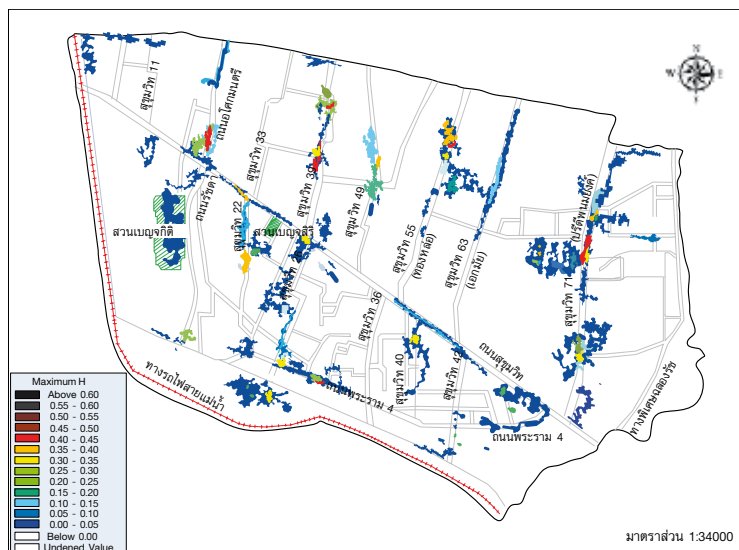
UTM-WSG 1984 zone 47N พบว่า มีน้ำล้นออกจากบ่อพักในพื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนาเป็นบางจุด มีระดับน้ำท่วมขัง 0.05 ถึง 0.20 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9

และจากการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ด้วยข้อมูลฝนราย 15 นาที ช่วงวันที่ 17-24 ตุลาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งมีปริมาณฝนตกสูงสุด 76 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่า มี

น้ำท่วมขังในพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ระดับน้ำท่วมขัง 0.05 ถึง 0.45 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 10 ปริมาณน้ำท่วมขังส่วนหนึ่งเป็นน้ำที่รอการระบายลงท่อและอุโมงค์ระบายน้ำขนาดใหญ่ตามแนวถนนสายหลัก ได้แก่ ถนนสุขุมวิท ถนนอโศกมนตรี ถนนสุขุมวิท 26, 63 และ 71 และถนนพระราม 4 เป็นต้น



รูปที่ 9 แผนที่แสดงระดับน้ำท่วมขังจากการเปรียบเทียบแบบจำลองช่วงวันที่ 8-16 ตุลาคม พ.ศ. 2556

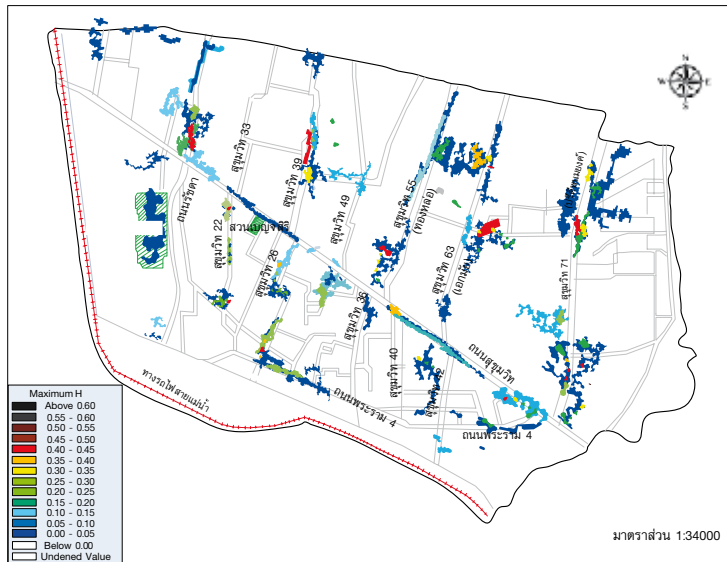


รูปที่ 10 แผนที่แสดงระดับน้ำท่วมขังจากการตรวจพิสูจน์แบบจำลองช่วงวันที่ 17-24 ตุลาคม พ.ศ. 2556

5.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่น้ำท่วม

การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่น้ำท่วม เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองในการจำลอง สภาพการไหลทั้งแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ โดยใช้เหตุการณ์ ฝนตกหนักในวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2558 ซึ่งมีปริมาณ ฝนตกสูงสุด 88 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ผลการจำลองสภาพ

น้ำท่วมขังในพื้นที่ศึกษา พบว่ามีน้ำท่วมขังในหลายพื้นที่ มี ระดับน้ำท่วม 0.05 ถึง 0.45 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่ง ผลการจำลองสภาพน้ำท่วมมีความสอดคล้องกับภาพถ่าย สภาพน้ำท่วมในพื้นที่ศึกษาจากสื่อต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 12 และรูปที่ 13



รูปที่ 11 แผนที่แสดงระดับน้ำท่วมขังในพื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนาวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2558



(ก) ชอยสุชุมวิท 23 [13]



(ข) ถนนโอโสคมอนตรี [14]

รูปที่ 12 เหตุการณ์น้ำท่วมขังบริเวณถนนโอโสคมอนตรีและถนนสุชุมวิทวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2558



(ก) ถนนพระราม4 [15]



(ข) เขตวัฒนา [15]

รูปที่ 13 เหตุการณ์น้ำท่วมขังบริเวณถนนพระราม 4 และเขตวัฒนา วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2558

6. สรุปผลและอภิปรายผล

จากผลการศึกษาการจำลองสภาพการไหลของระบบระบายน้ำของพื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนา โดยใช้แบบจำลอง MIKE FLOOD URBAN เพื่อประเมินสภาพน้ำท่วมและจัดทำแผนที่น้ำท่วม โดยใช้ชุดข้อมูลน้ำฝนราย 15 นาที ช่วงวันที่ 8-24 ตุลาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งมีปริมาณฝนตกสูงสุด 76 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่า มีระดับน้ำท่วมขัง 0.05 ถึง 0.45 เมตร และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่น้ำท่วม โดยใช้ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนักในวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2558 ซึ่งมีปริมาณฝนตกสูงสุด 88 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่า มีระดับน้ำท่วมขัง 0.05 ถึง 0.45 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลสภาพน้ำท่วมจริงในพื้นที่ศึกษา แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองผลาน 1 มิติ และ 2 มิติ MIKE FLOOD URBAN มีความแม่นยำสูงในการจำลองพื้นที่น้ำท่วมในเขตเมือง

นอกจากนี้ ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นถึงบริเวณพื้นที่ที่เกิดน้ำท่วมขังที่ควรเฝ้าระวังเป็นพิเศษ ซึ่งหน่วยงานภาครัฐสามารถนำแผนที่น้ำท่วมนี้ไปใช้ในการวางแผนการป้องกันน้ำท่วมและปรับปรุงระบบระบายน้ำเดิมในพื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อลดปัญหาการเกิดน้ำท่วมขังเนื่องจากเหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคตได้ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงาน DHI ประจำประเทศไทย ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสำนักการระบายน้ำกรุงเทพมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลน้ำฝน ข้อมูลระบายน้ำ และขอขอบคุณกรมพัฒนาที่ดิน ที่อนุเคราะห์ฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ ของพื้นที่ปิดล้อมคลองเตยวัฒนา

8. เอกสารอ้างอิง

1. Department of Drainage and Sewerage, 2014, Bangkok Flood Control Planning and Flood Operating Systems, Bangkok Metropolitan Administration. (In Thai)
2. Jianpinitnun, C., 1993, A Performance Evaluation of Secondary Drainage System in Bangkok Metropolitan Area using MOUSE Model, Master of Engineering Thesis, Department of Civil Engineering, Kasetsart University. (In Thai)
3. Mark, O., Weesakul, S. and Boonya-aroonnet, S., 2002, "Modeling of Urban Flooding in Bangkok, Global Solutions for Urban Drainage," *Proceedings of the 9th International Conference*, Portland, Oregon, United States, pp. 1-14.

4. Patro, S., Chatterjee, C., Mohanty, S., Singh, R. and Ranghuwanshi, N.S., 2009, "Flood Inundation Modeling using MIKE FLOOD and Remote Sensing Data," *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 37, pp. 107-118.
5. Naksua, W., 2011, Improvement of Primary Drainage System and Its Operation in Ratburana and Thungkhru Areas using MOUSE Model, Master of Engineering Thesis, Water Resources Engineering Division, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (In Thai)
6. Gilles, D., Young, N., Schroeder, H., Piotrowski, J. and Chang, Y.J., 2012, "Inundation Mappings of the Iowa Flood Center: Statewide Coverage and Detailed Urban Flooding Analysis," *Water (mdpi Journal)*, 4, pp. 85-106.
7. Seyoum, S.D., Vojinovic, Z., Price, R.K. and Weesakul, S., 2012, "Coupled 1D and Noninertia 2D Flood Inundation Model for Simulation of Urban Flooding," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 138, pp. 23-34.
8. Worawiwat, A., 2014, Urban Flood Drainage Management in Bangphlat Polder using MIKE FLOOD URBAN Model, Master of Engineering Thesis, Water Resources Engineering Division, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (In Thai)
9. DHI group, 2011, "User guide manual of MIKE URBAN Collection System", DHI group, Vol. 1.
10. Chanreab, A. and Marjang, N., 2013, "The Study of Primary Drainage System in Eastern Bangkok Metropolitan Area using HEC-RAS Mathematical Model by Flood Events in 2011," *Proceedings of the Graduate Research Conference 2013*, Khonkaen University, Khonkaen, Thailand. (In Thai)
11. USGS SDTS format Digital Elevation Model data (DEM), 2014, UTM-WSG 1984 zone 47N [Online], Available : <http://data.geocomm.com/dem/> [2014, October 12].
12. ASCE (1982), Gravity Sanitary Sewer Design and Construction, ASCE Manual of Practice No. 60, New York.
13. Thairath online, 2015 [Online], Available : <http://www.thairath.co.th/content/488792> [26 March 2015].
14. Dekd.com, 2015 [Online], Available : <http://www.dekd.com/board/view/3516079/> [8 May 2015].
15. Dailynews online, 2015 [Online], Available : <http://www.dailynews.co.th/crime/326651> [8 May 2015].