

ผลกระทบการอุดตันทางน้ำเข้าในระบบระบายน้ำ

The Effect of Inlet Clogging in Drainage System

พงศ์พันธุ์ กาญจนการุณ* สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ กฤษณ์ มณีกิจ ฉัฐวร ยอดปานท์ และวีระวัฒน์ จันชุกทิพย์
หลักสูตรวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงใหม่

ทรายขาว พาน เชียงราย 57120

Pongpan Kanjanakaroon* Surachai Amnuaypornlert Krit Maneekit Nattaworn Yodpanan and Weerawat Janchuthip

Department of Civil Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai Campus,

Sai Khao, Phan, Chiang Rai, 57120, Thailand

*Corresponding Author E-mail: pongpank@gmail.com

Received: Oct 07, 2021; Revised: Mar 08, 2022; Accepted: May 11, 2022

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อทางน้ำเข้าระบบระบายน้ำมีการอุดตันและนำเสนอรูปแบบทางน้ำเข้าที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โปรแกรม Storm and Sanitary Analysis 2018 ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบระบายน้ำ และระดับการท่วมขังที่เกิดขึ้นกับระบบระบายน้ำโครงการบ้านจัดสรรแก่งเสือเต้นวิลเลจ 3 กำหนดให้ทางน้ำเข้าเกิดการอุดตัน 0–90% ภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางน้ำเข้า 4 ชนิด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดการอุดตัน 50% ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนตะแกรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ากับขอบทางเท้าและทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้ามีระดับการท่วมขังต่ำสุดและสูงสุดโดยไม่เกิน 2 และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยมมีความเหมาะสมเมื่อพิจารณาในด้านงบประมาณติดตั้ง ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงกลมมีความเหมาะสมเมื่อพิจารณาความปลอดภัยในการขับขี่ ทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้าเป็นตัวเลือกที่ดีเมื่อใช้งานในพื้นที่เสี่ยงต่อการอุดตันต่ำและมีปริมาณน้ำเข้าน้อยเนื่องจากมีราคาถูกที่สุด

คำสำคัญ: ปัจจัยการอุดตัน, ทางน้ำเข้า, ระบบระบายน้ำ, การไหลในท่อ

Abstract

The purpose of this paper is to study the effect on drainage systems when inlets become clogged and to present a suitable inlet type for drainage systems. The Storm and Sanitary Analysis 2018 program was chosen to analyze the drainage system and the water level that occurs in the drainage of Kaeng Sua Ten Housing Estate plan 3. The inlets were rated by the degree of clogging using percentages from 0–90% against the 4 different types of inlets found in the estate. The results showed that at 50% clogging, the combination inlets and the curb opening only inlet had the lowest and highest level of flooding that not over 2 and 6 centimeters respectively. The rectangular grate inlet is suitable when considering the installation budget. The circular grate inlet is most suitable when considering driving safety. The curb opening inlet is a good choice for use in areas with low clogging risk and low volume of water intake because it is the cheapest.

Keywords: clogging factors, inlet, drainage system, pipe flow

1. บทนำ

ระบบระบายน้ำมีหน้าที่ระบายน้ำเพื่อไม่ให้เกิดการท่วมขังของน้ำ โดยลักษณะทั่วไปของระบบระบายน้ำประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนหลัก คือ โครงสร้างสำหรับลำเลียงน้ำ เช่น ทางน้ำเปิด ถนน ท่อน้ำทิ้ง และโครงสร้างเฉพาะที่ เช่น รางระบายน้ำ ทางน้ำเข้า บ่อพักน้ำ อาคารทางออก ในสภาวะที่เกิดฝนตกและมีขยะตกค้างบนผิวถนนอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันทางน้ำเข้าได้ จากรายงานปัญหาของการเกิดน้ำท่วมหลายครั้ง พบว่า การมีเศษวัสดุอุดตันทางน้ำเข้าเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการท่วมขังบนผิวถนน [1],[2] โดยเศษวัสดุที่อุดตันทางน้ำเข้านั้นจะทำให้น้ำระบายได้ในปริมาณที่ลดลง ด้วยเหตุนี้เมื่อมีน้ำฝนในปริมาณที่มากจึงทำให้เกิดการท่วมขังบนผิวถนน กรมทางหลวง [3] ได้จำแนกรูปแบบทางน้ำเข้าข้างทางสำหรับถนนได้ 3 ชนิด คือ ชนิดขอบทางเท้า ชนิดพื้นถนน และชนิดพื้นถนนผสมกับขอบทางเท้า ทั้งนี้ ในเกณฑ์การออกแบบระบบระบายน้ำของหน่วยงานต่าง ๆ ในประเทศไทย [4],[5] ไม่มีการพิจารณาถึงปัญหาการอุดตันทางน้ำเข้าซึ่งส่งผลกระทบต่อการระบายน้ำและการท่วมขังบนผิวถนน ในขณะที่งานวิจัยของต่างประเทศมีการศึกษาเรื่องดังกล่าว อาทิเช่น Guo [6] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของการระบายน้ำเมื่อเกิดการอุดตันทางน้ำเข้าแบบตะแกรงกรณีมีทางน้ำเข้าตำแหน่งเดียวและหลายตำแหน่ง ทั้งนี้ ได้ประยุกต์แนวทางดังกล่าวกับทางเข้ารูปแบบขอบทางเท้าอีกด้วย [7] และในงานวิจัยของ Gómez et al. [8] ได้ทำการหาปริมาณการอุดตันที่เหมาะสมเพื่อไปใช้ในการออกแบบ ถึงแม้ว่า ค่าการอุดตันส่วนใหญ่จะถูกใช้ที่ 50% แต่ผลการทดลองพบว่าค่าดังกล่าวจะอยู่ที่ 26.5–67.4% โดยขึ้นกับรูปแบบของทางน้ำเข้าและลักษณะการอุดตันเป็นหลัก ทั้งนี้ งานวิจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ยังขาดการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการใช้งานทางน้ำเข้าแต่ละชนิดในระบบระบายน้ำเมื่อเกิดการอุดตัน นอกจากนี้ ยังไม่มีการวิเคราะห์เพื่อหาชนิดทางน้ำเข้าที่เหมาะสมมาใช้ร่วมกันแบบผสมผสาน

ผลสาธิตในระบบระบายน้ำ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีเศษวัสดุอุดตันทางน้ำเข้า และความเหมาะสมในการใช้งานทางน้ำเข้าในการออกแบบระบบระบายน้ำเมื่อเกิดการอุดตัน ทำการวิเคราะห์กับรูปแบบทางน้ำเข้าทั้ง 3 รูปแบบที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้ เลือกใช้การออกแบบระบบระบายน้ำด้วยวิธีหลักเหตุและผล (Rational method) จากนั้นทำการวิเคราะห์ระดับการท่วมขังภายใต้การเปลี่ยนแปลงชนิดของทางน้ำเข้าและร้อยละของการอุดตันทางน้ำเข้าต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรมวิเคราะห์พายุฝนและสุขาภิบาล (Storm and Sanitary Analysis program) รุ่นเพื่อการศึกษา ซึ่งเป็นโปรแกรมเสริมในโปรแกรม Autodesk Civil 3D โดยโปรแกรมมีเครื่องมือในการวิเคราะห์เกี่ยวกับระดับการท่วมขังบนผิวถนนในกรณีที่มีเศษวัสดุอุดตันทางน้ำเข้าในรูปแบบต่าง ๆ ได้อีกด้วย การศึกษานี้จะประยุกต์ใช้กับพื้นที่โครงการบ้านจัดสรร เทศบาลตำบลแก่งเสือเต้น อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดลพบุรี หาปัจจัยการอุดตันที่เหมาะสมในการใช้ออกแบบตั้งแต่ 0–90% จากนั้นเลือกค่าปัจจัยการท่วมขังที่ระดับการท่วมขังเริ่มมากขึ้นมาวิเคราะห์ความเหมาะสมในการใช้งานทางน้ำเข้าต่าง ๆ ต่อไป

2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบระบบระบายน้ำคือการหาขนาดของท่อและความลาดชันที่สามารถรับปริมาณน้ำท่าจากน้ำฝนที่ตกลงมาในประเทศไทยกำหนดให้คำนวณหาปริมาณน้ำท่าจากฝนด้วยวิธีหลักเหตุและผลสำหรับพื้นที่ระบายน้ำที่มีขนาดไม่เกิน 25 ตารางกิโลเมตร [3–5] ขนาดของท่อและความลาดชันสามารถหาได้ด้วยสมการการไหลในทางน้ำเปิดโดยนำอัตราการไหลที่ได้จากวิธีหลักเหตุและผลมาคำนวณ ทั้งนี้ โปรแกรมวิเคราะห์พายุฝนและสุขาภิบาลสามารถทำการวิเคราะห์โดยใช้หลักการดังกล่าวและยังสามารถทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในท่อตามเวลาอีกด้วย

2.1 โปรแกรมวิเคราะห์พายุฝนและสุขาภิบาล

โปรแกรมวิเคราะห์พายุฝนและสุขาภิบาล (Storm and sanitary analysis program; SSA) ถูกใช้ในการวิเคราะห์การไหลในระบบระบายน้ำและผลกระทบจากการอุดตันทางน้ำเข้า โปรแกรมดังกล่าวรองรับทั้งหน่วยและมาตรฐานของระบบ US และ SI ประกอบด้วยเครื่องมือในการทำงานเกี่ยวกับระบบการระบายน้ำ เช่น การสร้างแนวเส้นท่อระบายน้ำต่าง ๆ รวมถึงปรับแต่งตำแหน่ง Node การสร้างพื้นที่รับน้ำ การนำเข้าข้อมูลปริมาตรน้ำฝน รวมถึงการจำลองสถานการณ์ฝนตก เพื่อให้โปรแกรมแสดงผลความสามารถในการระบายน้ำแบบทันต่อเหตุการณ์ อีกทั้งยังมีความสามารถช่วยในการปรับแต่งขนาดของท่อ และการส่งออกโมเดลในลักษณะ 3 มิติ ไปยังโปรแกรมอื่น ๆ เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น [9]

2.2 วิธีหลักเหตุและผล (Rational method)

วิธีหลักเหตุและผลจะใช้หลักการเปลี่ยนความเข้มฝนเป็นค่าอัตราการไหลหลากภายใต้ตัวคุณสมบัติพื้นที่และขนาดพื้นที่ แสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$Q_R = \frac{I \sum (C_i A_i)}{3.6} \quad (1)$$

เมื่อ Q_R คือ อัตราการไหลของน้ำฝน, ลบ.ม.ต่อวินาที

I คือ ความเข้มฝน, มม./ชม.

C_i คือ สัมประสิทธิ์น้ำท่าของพื้นที่ย่อย i

A_i คือ พื้นที่ลุ่มน้ำย่อย i , ตร.กม.

จากนั้นค่าอัตราการไหลของน้ำฝนที่ได้จะนำไปใช้เป็นค่าอัตราการไหลในท่อระบายน้ำเพื่อคำนวณหาขนาดของท่อระบายน้ำภายใต้ความลาดชันที่กำหนดดังสมการที่ (2)

$$Q_R = Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลในท่อระบายน้ำ, ลบ.ม./ว.

n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่ง และสำหรับท่อคอนกรีตจะใช้ค่าเท่ากับ 0.017

R = รัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic Radius), ม.

$= A/P$

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อหรือทางน้ำไหล, ตร.ม.

P = เส้นขอบเปียก, ม.

S = ความลาดชันท่อออกแบบ

2.3 การไหลหลากทางชลศาสตร์ (Hydraulic Routing)

จากการคำนวณค่าอัตราการไหลในเส้นท่อ ในหัวข้อ 2.2 สามารถนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการจำลองการไหลหลากระหว่างเส้นท่อ โดยใช้วิธีอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ทางชลศาสตร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการไหลตามความยาวของลำน้ำและช่วงเวลาที่พิจารณา [10] ดังสมการที่ (3)

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (3)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหล, ลบ.ม.ต่อวินาที

y คือ ความลึกของการไหล, ม.

x คือ ระยะทางตามแนวความยาวการไหล, ม.

A คือ พื้นที่หน้าตัดตามขวางของการไหล, ตร.ม.

t คือ เวลา, วินาที

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, ม./วินาที²

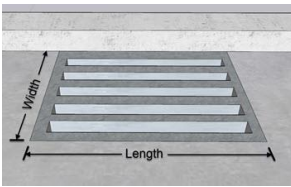
S_0 คือ ความลาดชันของท้องน้ำ

S_f คือ ความลาดชันของเส้นระดับพลังงาน

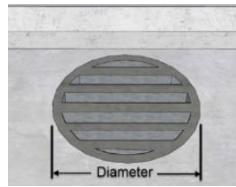
2.4 ทางน้ำเข้าที่ใช้ในการศึกษา

หน้าที่หลักของทางน้ำเข้าระบบระบายน้ำคือการนำน้ำผิวดินจากฝนที่ตกในพื้นที่รับน้ำลงสู่ท่อระบายน้ำ หน้าที่รองคือเป็นตำแหน่งในการบำรุงดูแลการอุดตันในเส้นท่อน้ำเข้าที่ใช้ในการศึกษาเป็นไปตามที่ กรมทางหลวง [3] กำหนดไว้ 3 รูปแบบ อีกทั้งในงานวิจัยยังเพิ่มเติมรูปแบบชนิดพื้นถนนเพิ่มอีก 1 ชนิด โดยลักษณะทางน้ำเข้าที่ใช้ในการวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย 1) ทางน้ำเข้าพื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยม (Grated Inlet-Rectangular) และ 2) ทางน้ำเข้าพื้นถนนแบบตะแกรงกลม (Grated Inlet-Circular) 3) ทางน้ำเข้ารูปแบบขอบทางเท้า (Curb-Opening

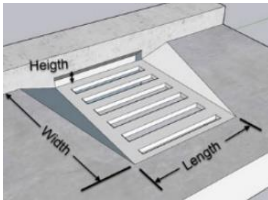
Inlet) และ 4) ทางน้ำเข้ารูปแบบผสมผสาน (Combination Inlet)



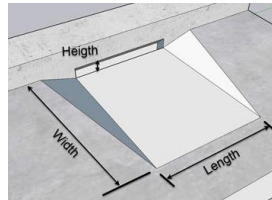
Grate inlet: Rectangular



Grate inlet: Circular



Combination inlet



Curb inlet

รูปที่ 1 ลักษณะของทางน้ำเข้าที่ใช้ในโครงการ

2.5 อัตราการไหลเข้าช่องระบายน้ำและปัจจัยการอุดตัน

Urban Drainage and Flood Control District [11] ได้เสนอการคำนวณอัตราการไหลของช่องเปิดทางระบายน้ำแบบตะแกรงแบ่งเป็น 3 กรณี กรณีที่ 1 น้ำขังอยู่เหนือตะแกรงไม่มาก เช่น มีน้ำสูงไม่เกิน 12 ซม. การไหลของน้ำลงผ่านช่องเปิดของตะแกรงจะมีพฤติกรรมเป็นการไหลผ่านฝายน้ำล้น (weir) ที่มีความยาว L เท่ากับผลรวมของเส้นขอบตะแกรงที่น้ำจะไหลและมีสัมประสิทธิ์การไหล C_w ประมาณ 3.0 กรณีที่ 2 น้ำขังอยู่เหนือตะแกรงมาก เช่น มีน้ำสูงเกินกว่า 0.4 ม. การไหลของน้ำลงผ่านช่องเปิดของตะแกรงจะมีพฤติกรรมเป็นการไหลผ่านรูระบาย (orifice) ที่มีพื้นที่หน้าตัดการไหลเท่ากับพื้นที่ระหว่างช่องเปิดของตะแกรงโดยมีความสูงน้ำเท่ากับความลึกของน้ำตั้งแต่ขอบบนของตะแกรงจนถึงผิวน้ำ และมีสัมประสิทธิ์อัตราการไหล C_w ประมาณ 0.6 และกรณีที่ 3 น้ำขังอยู่เหนือตะแกรงปานกลาง เช่น ประมาณ 0.1 ม. ถึง 0.4 ม. จะมีพฤติกรรมการไหลผ่านช่องเปิดของตะแกรงแบบผสมระหว่างฝายน้ำล้นกับการไหลแบบรูระบาย

สำหรับการคำนวณหาอัตราการไหลเข้าช่องเปิดขอบทางเท้า เนื่องจากความสูงน้ำน้อยกว่าความสูงช่องเปิดที่ขอบทางสภาพการไหลจะมีลักษณะเหมือนกับการไหลผ่านฝายน้ำล้น

โดยมีสัมประสิทธิ์อัตราการไหลประมาณ 3.1 แต่ถ้าความสูงน้ำในแอ่งน้ำมากกว่าความสูงของช่องเปิดเกินกว่า 2 เท่า สภาพการไหลจะมีลักษณะเหมือนกับการไหลผ่านรูระบายที่มี $C_d = 0.7$ ซึ่งสามารถหาอัตราการไหลได้จากสมการที่ (4)

$$Q = 3.1Lbh^{0.5} \quad (4)$$

เมื่อ b คือ ความสูงของช่องเปิด, ม.

h คือ ความลึกน้ำเหนือระดับกึ่งกลางของช่องเปิด, ม.

L คือ ความยาวของทางน้ำเข้า, ม.

ปัจจัยการอุดตันช่องระบายน้ำในการศึกษานี้คือปัจจัยที่ลดประสิทธิภาพการระบายน้ำฝนของฝายตะแกรงตามเปอร์เซ็นต์ที่ระบุเพื่อพิจารณาการอุดตันของเศษซาก ซึ่งไม่คำนึงถึงชนิดหรือประเภทของสิ่งอุดตัน ตัวอย่างเช่นค่าการอุดตันที่ 80% จะทำให้พื้นที่รับน้ำของตะแกรงลดลง 80% ตัวอย่างการอุดตันทางน้ำเข้า แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การอุดตันทางน้ำเข้า

ในกรณีที่ทางน้ำเข้าในการออกแบบมีหลายตำแหน่ง จะวิเคราะห์ปัจจัยลดการอุดตันตามสมการที่ Guo [7] พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาการอุดตันที่ "สลายน้" โดยทางน้ำเข้าหลายจุดสามารถช่วยกันระบายน้ำได้ดียิ่งขึ้น สาเหตุการอุดตันที่สลายน้เนื่องจากปริมาณการไหลบ่าระลอกแรก (First flush) ทำให้มีเศษวัสดุอุดตันไหลไปทางด้านท้ายน้ำแล้วไป

ลดต้นบริเวณตะแกรงด้านท้ายน้ำมากกว่าด้านต้นน้ำ แสดง
ดังสมการที่ (5)

$$C = \frac{1}{N} (C_0 + eC_0 + e^2C_0 + e^3C_0 \dots + e^{N-1}C_0) = \frac{C_0}{N} \sum_{i=1}^N e^{i-1} = \frac{KC_0}{N} \quad (5)$$

เมื่อ C = ปัจจัยการลดต้นสำหรับทางน้ำเข้าที่มีหลาย
ตำแหน่ง
 C_0 = ปัจจัยการลดต้นทางน้ำเข้าแบบเดี่ยว
 e = อัตราส่วนการสลายตัว 0.5 สำหรับช่องระบาย
น้ำแบบตะแกรง และ 0.25 สำหรับช่องระบาย
น้ำแบบขอบทาง
 N = จำนวนของทางน้ำเข้าแบบตะแกรง
 K = ค่าสัมประสิทธิ์การลดต้นขึ้นกับชนิดของทาง
น้ำเข้า [11]

2.6 ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ

ความเข้มฝนที่ใช้ในการออกแบบได้จากสถานีฝน
จังหวัดลพบุรี โดยอารียา ฤทธิมา และคณะ [12] ได้ทำการ
วิเคราะห์สมการความเข้มฝนออกแบบในรูปสมการยกกำลัง
แสดงได้ดังสมการที่ (6) ทั้งนี้ในการศึกษาจะเลือกใช้ความ
เข้มฝนที่รอบปีการเกิดซ้ำ 5 ปี ($Tr = 5$) เนื่องจากเป็นรอบปี
การเกิดซ้ำสำหรับการออกแบบระบบระบายน้ำหมู่บ้าน
จัดสรร [4]

$$I = \frac{2,781.46Tr^{0.2}}{T_c + 32.91} \quad (6)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มฝน, มม./ชม.
 Tr คือ รอบปีการเกิดซ้ำที่พิจารณา, ปี
 T_c คือ เวลาการไหลรวมตัวของน้ำท่า, นาที
สัมประสิทธิ์การไหลและเวลาการรวมตัวของน้ำท่าใช้
ตามค่ากำหนดของสำนักมาตรฐานการบริหารงานองค์กร
ปกครองส่วนท้องถิ่น [5]

2.7 ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟ (Nash-Sutcliffe efficiency)

ค่าอัตราการไหลที่ได้จากโปรแกรมและรายการคำนวณ
จะถูกนำไปหาความถูกต้องโดยประสิทธิภาพ Nash and
Sutcliffe [13] โดยวิเคราะห์ผลรวมกำลังสองของผลต่าง
ระหว่างค่าในโปรแกรมและค่าจากรายการคำนวณ ดังสมการ
ที่ (7)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (7)$$

เมื่อ NSE คือ ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟ
 Q_i คือ อัตราการไหลที่ได้จาก Spreadsheet
 Q_{si} คือ อัตราการไหลที่ได้จากโปรแกรม
 $\bar{Q}$ คือ อัตราการไหลเฉลี่ยที่ได้จาก Spreadsheet
ค่าของ NSE ที่ได้จะต้องมีค่ามากกว่า 0.65 ตาม
ข้อเสนอแนะของ Moriasi et al. [14] หากต่ำกว่าจะต้องพิจารณา
การคำนวณใหม่ทั้งหมด

2.8 รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error)

Hogue และคณะ [15] ได้เสนอแนวคิดของการหาค่าเฉลี่ย
ของความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลจริงและข้อมูลจำลองใน
รูปแบบรากที่สอง ดังสมการที่ (8)

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{si})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

เมื่อ $RMSE$ คือ รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
หากค่า $RMSE$ ที่หาได้จากการจำลองน้อยกว่าครึ่งหนึ่ง
ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงว่าข้อมูลที่จำลองยอมรับได้
ตามข้อเสนอแนะของ Fiseha, B. M. และคณะ [16]

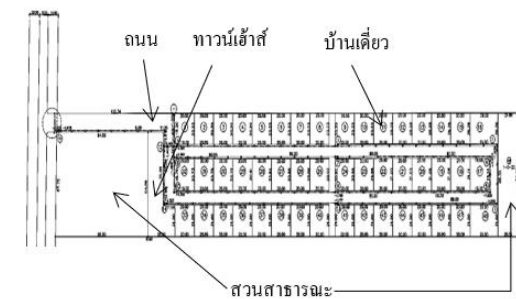
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษา

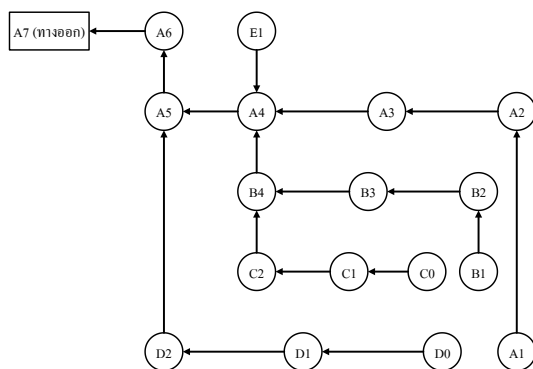
พื้นที่ออกแบบเลือกใช้ผังโครงการหมู่บ้านจัดสรรแห่ง
เดินวิเลง 3 แสดงได้ดังรูปที่ 3 ตั้งอยู่ที่เทศบาลตำบลแก่งเสือ
เต้น อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดลพบุรี พิกัด N14°50'31.12"

E101°03'17.46" มีพื้นที่รวม 36,800 ตร.ม. ลักษณะการใช้พื้นที่ ประกอบด้วยบ้านเดี่ยว ทาวน์เฮาส์ ถนน และสวนสาธารณะ โดยสัมปสิทธิ์การไหลของแต่ละพื้นที่แสดงได้ดังตารางที่ 1

ในโครงการมีตำแหน่งบ่อบำบัดน้ำ (Manhole) 18 ตำแหน่ง จำนวนทางน้ำเข้า 113 ตำแหน่ง โดยมีแผนผังเส้นทางการไหลได้ดังรูปที่ 4 กำหนดระยะระหว่างทางน้ำเข้าแต่ละตำแหน่งอยู่ห่างกันไม่เกิน 15 เมตร



รูปที่ 3 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงพื้นที่ของโครงการบ้าน
จัดสรรหมู่บ้านแกลงเสียดินวิไลเลข 3



รูปที่ 4 ผังเส้นทางการระบายน้ำในโครงการ

ตารางที่ 1 สัมปสิทธิ์การไหลตามลักษณะพื้นที่

ลักษณะการใช้พื้นที่	C
บ้านเดี่ยว	0.60
ทาวน์เฮาส์	0.80
สวนสาธารณะ	0.20
ถนน	0.90

3.2 การรวบรวมและจัดทำข้อมูลพื้นฐาน

ประกอบด้วยการจัดหาหรือกำหนดข้อมูลพื้นฐานของสภาพพื้นที่ระบายน้ำ ตำแหน่งการระบายน้ำออก ทางระบายน้ำสาธารณะ ขนาดพื้นที่ใช้สอยแยกตามประเภทหรือลักษณะสิ่งก่อสร้าง แบบภูมิประเทศตลอดจนค่าระดับพื้นที่

3.3 การวางแผนเส้นทางการระบายน้ำ

ในขั้นตอนนี้จะทำการวางแผนกำหนดทิศทางการระบายน้ำ เริ่มต้นจากการเลือกทางออกของการระบายน้ำสายหลักและสายรอง ทำการแบ่งพื้นที่โครงการออกเป็นพื้นที่ย่อย ๆ ให้สัมพันธ์กับการระบายน้ำในท่อสายต่าง ๆ จากนั้นกำหนดจุดเชื่อมต่อระหว่างท่อระบายน้ำสายหลักกับท่อระบายน้ำสายรองให้สัมพันธ์กับการต่อเชื่อมและขนาดพื้นที่ระบายน้ำ โดยผังการออกแบบระบบระบายน้ำของงานวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4

3.4 การวิเคราะห์ระบบระบายน้ำตามมาตรฐานการออกแบบ

ทำการวิเคราะห์ระบบระบายน้ำโดยใช้โปรแกรม Spreadsheet ทำการหาขนาดท่อและความลาดชันที่เกิดขึ้นภายใต้ข้อกำหนดต่าง ๆ เลือกใช้รอบปีการเกิดซ้ำ 5 ปี เป็นหลักในการออกแบบ

3.5 การวิเคราะห์ระบบระบายน้ำด้วยโปรแกรมวิเคราะห์พา俞

ฝนและสุขาภิบาล

ทำการจำลองระบบระบายน้ำโดยใช้โปรแกรมภายใต้คุณสมบัติพื้นฐานการออกแบบที่เหมือนกัน เช่น ความลาดชันท่อ ลักษณะการใช้พื้นที่ ค่าสัมปสิทธิ์การไหล อีกทั้งยังกำหนดให้ทางน้ำเข้าแต่ละแบบมีพื้นที่หน้าตัดการระบายน้ำที่เท่ากัน โดยมีมิติทางน้ำเข้าประกอบด้วย 1) ทางน้ำเข้า

พื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยมขนาด 0.60×1.00 ม.² และ 2) ทางน้ำเข้าพื้นถนนแบบตะแกรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.88 ม. 3) ทางน้ำเข้ารูปแบบขอบทางเท้าขนาด 0.25×2.40 ม.² และ 4) ทางน้ำเข้ารูปแบบผสมผสานใช้ขนาดตามรูปแบบ 1) และ 3) รวมกัน

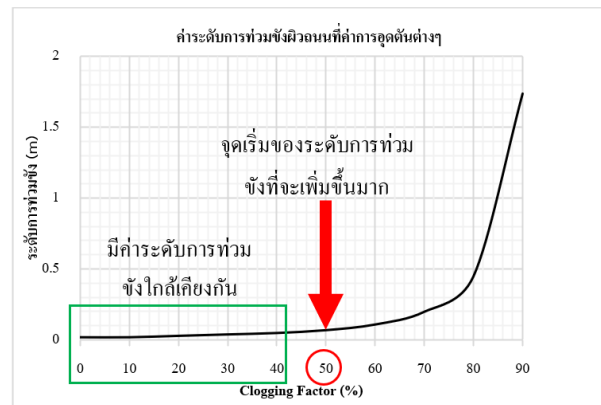
3.6 การตรวจสอบความถูกต้องในการวิเคราะห์ของโปรแกรม

ทำการตรวจสอบความถูกต้องในการวิเคราะห์ของโปรแกรม โดยนำค่าอัตราการไหลที่ได้จากโปรแกรมมาตรวจสอบกับอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณในข้อ 3.4 และ 3.5 ภายใต้การกำหนดขนาดท่อและความลาดชันเดียวกัน โดยค่าอัตราการไหลทั้งสองจะต้องมีประสิทธิภาพเนซ-ชัตคลิฟ มากกว่า 0.65 ขึ้นไปและค่ารากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หากไม่ผ่านเกณฑ์ให้พิจารณาความผิดพลาดที่เกิดจากการป้อนค่าให้ถูกต้อง

3.7 การวิเคราะห์ผลกระทบเมื่อทางน้ำเข้ามีการอุดตัน

เมื่อทำการปรับเทียบการคำนวณและโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว จะทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อทางน้ำเข้ามีการอุดตัน โดยทำการปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของการอุดตัน (Clogging factor) ตั้งแต่ 0, 10, 20,..., 80 จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ พบว่าที่การอุดตัน 50% เป็นจุดเริ่มของระดับการท่วมขังที่จะเริ่มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ Clogging Factor 0–40% จะมีค่าระดับน้ำที่ท่วมขังเพิ่มขึ้นทีละน้อยและมีค่าระดับการท่วมขังที่ใกล้เคียง

ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกกรณีการอุดตัน 50% และกรณีที่ไม่มีการอุดตัน (การอุดตัน 0%) มาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบการท่วมขังบนผิวถนนภายใต้การเปลี่ยนแปลงทางน้ำเข้ารูปแบบต่าง ๆ



รูปที่ 5 ค่าระดับการท่วมขังผิวถนนที่ค่าการอุดตันต่าง ๆ

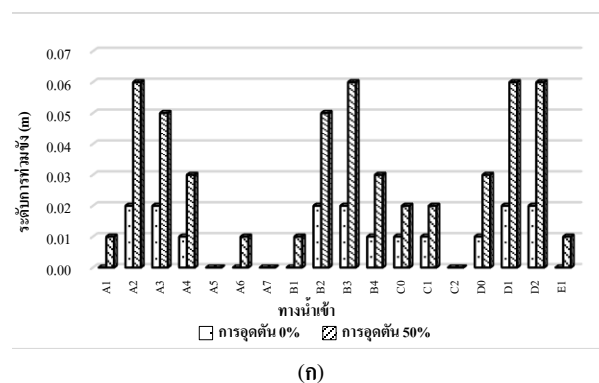
4. ผลการวิจัย

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

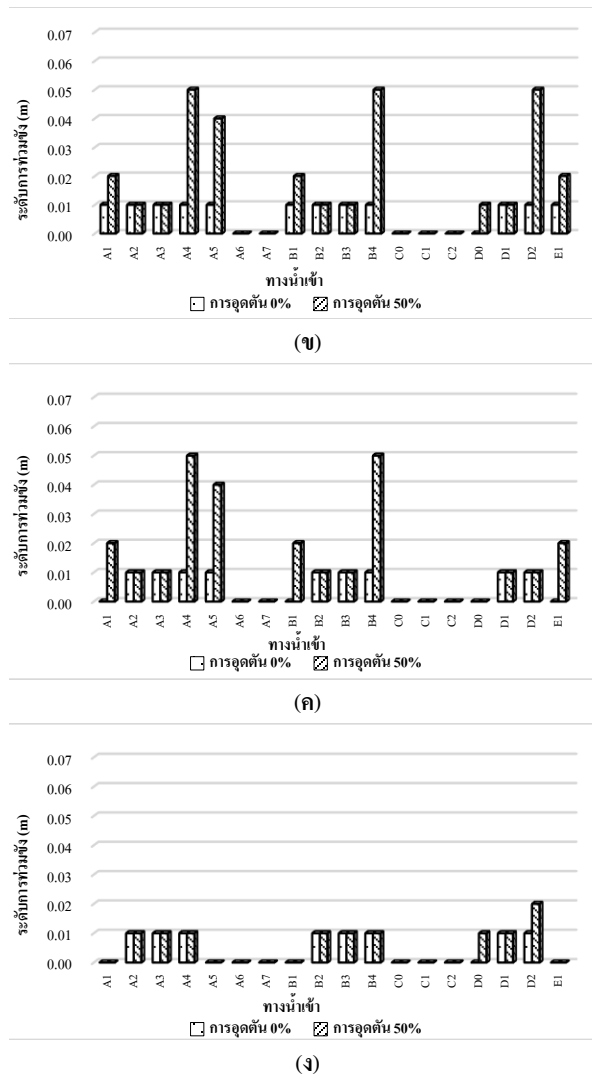
จากการหาประสิทธิภาพ เนซ-ชัตคลิฟ ระหว่างค่าอัตราการไหลที่ได้จาก Spreadsheet และ โปรแกรมวิเคราะห์พายุฝนและสุขาภิบาล ได้ค่า *NSE* ที่ 0.995 ซึ่งมากกว่าค่าแนะนำของ Moriasi et al. [14] แสดงได้ว่าค่าอัตราการไหลที่ได้มีความถูกต้องต้องและน่าเชื่อถือ อีกทั้งผลการวิเคราะห์ค่า *RMSE* อยู่ที่ 0.007 ซึ่งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.096

4.2 ระดับการท่วมขังบนผิวถนนในรูปแบบทางน้ำเข้าต่าง ๆ

ความสามารถในการระบายน้ำประเมนได้จากค่าระดับการท่วมขังบนผิวถนน รูปที่ 6 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลง



(ก)



รูปที่ 6 ระดับการท่วมขังผิวน้ำของทางน้ำเข้าแต่ละแบบ (ก) ชนิดขอบทางเท้า (ข) ชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยม (ค) ชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงกลม (ง) ชนิดพื้นถนนตะแกรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขอบทางเท้า

ระดับการท่วมขังเมื่อร้อยละการอุดตันเพิ่มขึ้นในทางน้ำเข้า โดยจะเห็นได้ว่า เมื่อไม่มีการอุดตันในทางน้ำเข้า (การอุดตัน 0%) ระดับการท่วมขังจะอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 0.02 เมตร ในทางน้ำเข้าทั้ง 4 ชนิด แต่เมื่อเกิดการอุดตัน 50% พบว่า ค่าระดับการท่วมขังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดของทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้า (รูปที่ 6(ก)) มีการเพิ่มของระดับการท่วมขังอยู่บ้างในบางจุดของทางน้ำเข้าชนิด

พื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยมและตะแกรงกลม (รูปที่ 6(ข)–(ค)) โดยแบบตะแกรงกลมจะมีระดับการท่วมขังที่น้อยกว่าแบบตะแกรงสี่เหลี่ยมเนื่องจากแบบตะแกรงกลมมีหน้าตัดที่ดีที่สุดในทางชลศาสตร์ ทำให้น้ำสามารถไหลเข้าได้ดีกว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดของช่องระบายน้ำเท่ากัน สำหรับทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนผืนผ้าขอบทางเท้า (รูปที่ 6(ง)) จะไม่มีการเพิ่มระดับการท่วมขังเมื่อเกิดการอุดตันยกเว้นตำแหน่ง D2 เนื่องจากทางน้ำเข้าตำแหน่งดังกล่าวมีประสิทธิภาพต่ำในการระบายของทางน้ำเข้าแบบตะแกรงขอบทางเท้าและตะแกรงสี่เหลี่ยม (รูปที่ 6(ก)–(ข)) เมื่อนำมาใช้ร่วมกันจะทำให้ประสิทธิภาพการระบายเพิ่มขึ้น (ระดับการท่วมขังลดลง) แต่ยังคงมีระดับการท่วมขังที่สูงกว่าแบบตะแกรงกลมอย่างเดียว เมื่อพิจารณาการอุดตันต่อระดับการท่วมขังในทางน้ำเข้าทั้ง 4 ชนิด พบว่าทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้ามีประสิทธิภาพในการระบายน้ำต่ำสุด เนื่องจากมีระดับการท่วมขังบนผิวน้ำในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับทางน้ำเข้าชนิดอื่น และทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนผืนผ้าขอบทางเท้ามีประสิทธิภาพในการระบายน้ำสูงสุด เนื่องจากมีระดับการท่วมขังบนผิวน้ำในระดับที่ต่ำเมื่อเทียบกับทางน้ำเข้าชนิดอื่น ซึ่งประสิทธิภาพการระบายน้ำของทางน้ำเข้าแต่ละชนิดที่แตกต่างกันนี้จะนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ดังรายละเอียดหัวข้อถัดไป

4.3 ผลการใช้งานทางน้ำเข้าที่เหมาะสม

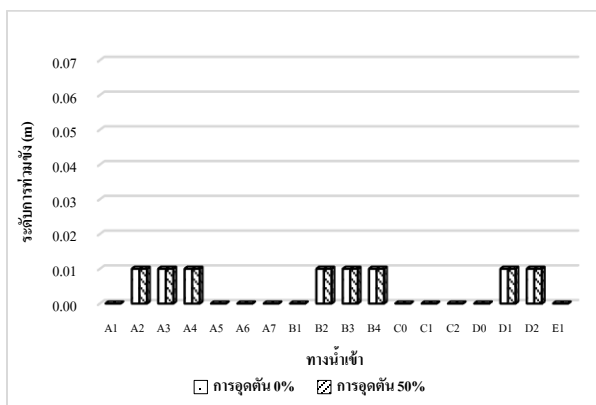
ในกรณีที่เกิดการอุดตันทางน้ำเข้า 50% การเลือกใช้งานรูปแบบทางน้ำเข้าพิจารณาจากระดับการท่วมขังที่น้อยและราคาทางน้ำเข้าที่ประหยัด โดยผลการศึกษาของ Lottes et al [17] บ่งชี้ว่าที่ระดับการท่วมขังมากกว่า 2.4 มม. ส่งผลต่อความเร็วของยานพาหนะที่จะลื่นไถล (hydroplane) อย่างมีนัยยะสำคัญ ดังนั้นทางน้ำเข้าที่มีระดับการท่วมขังน้อยกว่า 2.4 มม. จะถูกนำมาเลือกใช้งาน และในกรณีที่ระดับทางน้ำเข้าต่ำกว่า 2.4 มม. จะเลือกจากราคาของทางน้ำเข้า โดยตารางที่ 2 แสดงราคาทางน้ำเข้าประเภทต่างๆ ตามราคาท้องตลาด

ตารางที่ 2 ราคาของทางน้ำเข้ารูปแบบต่างๆ

รูปแบบทางน้ำเข้า	ราคา (บาท)
ทางน้ำเข้าพื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยม	1,100
ทางน้ำเข้าพื้นถนนแบบตะแกรงกลม	1,920
ทางน้ำเข้ารูปแบบขอบทางเท้า	700
ทางน้ำเข้ารูปแบบผสมผสาน	2,500

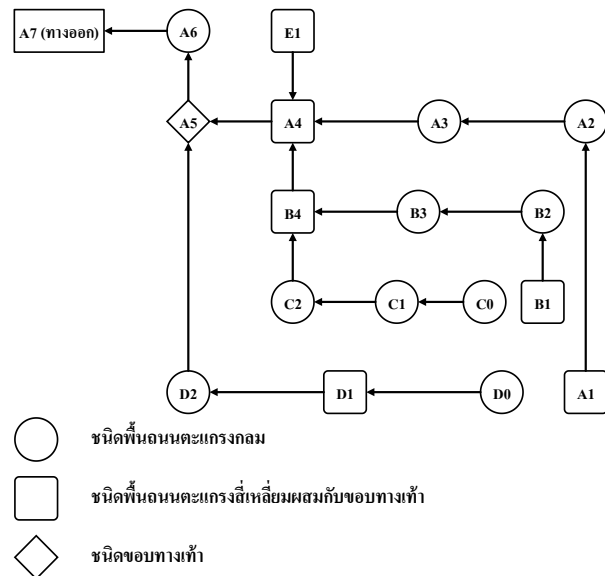
หมายเหตุ อ้างอิงที่ขนาดตะแกรง 0.5 ม. × 0.5 ม.

ผลการวิเคราะห์ระดับการท่วมขังหลังจากเลือกใช้ทางน้ำเข้าที่มีระดับการท่วมขังต่ำสุดและราคาประหยัดแสดงได้ดังรูปที่ 7 โดยมีระดับการท่วมขังที่ตำแหน่งต่าง ๆ ไม่เกิน 0.01 เมตร ลักษณะของทางน้ำเข้าที่เหมาะสมแต่ละตำแหน่งแสดงได้ดังรูปที่ 8 ประกอบด้วยทางน้ำเข้า ชนิดพื้นถนนตะแกรงกลม ชนิดพื้นถนนตะแกรงสี่เหลี่ยมผสมกับขอบทางเท้า และชนิดขอบทางเท้า จำนวน 11, 6 และ 1 ตัวตามลำดับ



รูปที่ 7 ระดับน้ำบนผิวถนนเมื่อติดตั้งรูปแบบทางน้ำเข้าให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่

ทั้งนี้ หากพิจารณาที่ความคุ้มค่าของการติดตั้ง ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงกลมมีราคาที่สูงกว่าแบบอื่น ๆ ซึ่งหากมีการยอมให้มีระดับการท่วมขังเพิ่มขึ้น อาจปรับไปใช้ทางน้ำเข้าแบบอื่น ๆทดแทนได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้งานจริงทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงกลมมีความปลอดภัยต่อการขับขึ้นถนนมากกว่า



รูปที่ 8 รูปแบบทางน้ำเข้าชนิดต่าง ๆ ในแต่ละจุด

5. อภิปรายผลการศึกษา

การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการอุดตันที่ปัจจัยการอุดตัน 50% ของทางน้ำเข้ารูปแบบต่าง ๆ ต่อการระบายน้ำ พบว่า ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนตะแกรงสี่เหลี่ยมผสมกับขอบทางเท้ามีประสิทธิภาพในการระบายน้ำได้ดีที่สุด สอดคล้องกับงานของ Veerappan and Le [18] ที่พบว่าทางน้ำเข้าตะแกรงสี่เหลี่ยมผสมกับขอบทางเท้าดีกว่าตะแกรงสี่เหลี่ยมแบบปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดการอุดตันมากกว่า 100% สำหรับรูปแบบทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้าไม่เหมาะสมในพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการอุดตันสูง การใช้ทางน้ำเข้าให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่นั้นแม้ว่าทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงกลมมีความปลอดภัยต่อการขับขึ้นถนน และความสวยงามมากกว่าทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยม แต่ในเรื่องของความประหยัดตะแกรงสี่เหลี่ยมมีราคาที่ถูกลงกว่าตะแกรงกลม ดังนั้นถ้าหากมีการจำกัดในเรื่องงบประมาณควรจะเลือกใช้ตะแกรงสี่เหลี่ยมเนื่องจากการระบายน้ำของตะแกรงทั้ง 2 ชนิดนี้มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน ตะแกรงสี่เหลี่ยมจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการนำมาใช้ในรูปแบบทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนน ในส่วนของพื้นที่ที่มีการรับน้ำในปริมาณมากควรใช้ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนตะแกรง

สื่เหลียมผสมกับขอบทางเท้าเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการระบายน้ำที่ดีที่สุด และพื้นที่ที่มีการรับน้ำในปริมาณน้อยและมีความเสี่ยงต่อการอุดตันน้อยจะใช้ทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้าเนื่องจากมีความประหยัดในเรื่องของงบประมาณมากที่สุด

6. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอระดับการท่วมขังของรูปแบบทางน้ำเข้าชนิดต่าง ๆ ที่ค่าการอุดตันทางน้ำ 0% และ 50% ของพื้นที่ทางน้ำเข้า จากนั้นทำการปรับใช้รูปแบบทางน้ำเข้าให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ ผลการศึกษาบ่งชี้ว่า ที่ค่าการอุดตัน 0% มีระดับการท่วมขังไม่เกิน 2 ซม. ของทุกรูปแบบทางน้ำเข้า ในขณะที่การอุดตันทางน้ำเข้า 50% สำหรับทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนตะแกรงสื่เหลียมผสมกับขอบทางเท้ามีระดับการท่วมขังต่ำสุด และทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้ามีระดับการท่วมขังสูงสุด การประยุกต์ใช้รูปแบบทางน้ำเข้าที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่จะทำให้ระดับการท่วมขังไม่เกิน 1 ซม. และเมื่อพิจารณาในเรื่องของการใช้งานทางน้ำเข้าชนิดตะแกรงกลมจะมีความปลอดภัยต่อการขับขึ้นถนนมากกว่าชนิดตะแกรงสื่เหลียม แต่ในเรื่องของราคาทางน้ำเข้าชนิดตะแกรงสื่เหลียมจะมีราคาที่ถูกกว่า และการใช้ทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้าเป็นตัวเลือกที่ดีในการใช้งานในพื้นที่ที่มีการรับน้ำในปริมาณน้อยและเสี่ยงต่อการอุดตันต่ำเนื่องจากมีราคาที่ถูกต้อง

7. ข้อเสนอแนะ

1) ในงานวิจัยนี้ใช้ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลจากการคำนวณและโปรแกรม ซึ่งหากใช้ค่าอัตราการไหลจริงในท้องจะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีขึ้น

2) ในอนาคตควรทำการศึกษาเกี่ยวกับหมู่บ้านจัดสรรหรือพื้นที่จัดสรรแบบอื่นเพื่อดูว่ารูปแบบทางน้ำเข้าที่นำเสนอในงานวิจัยสามารถใช้ได้กับทุกพื้นที่

3) การพิจารณาการระบายน้ำควรศึกษาเกี่ยวกับประเด็นของเวลาในการระบายน้ำเพิ่มเติมเพื่อทำให้งานวิจัยครอบคลุมรอบด้านยิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ฟินิกซ์ อินสเปกเตอร์ ดีไซน์ คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการศึกษา และขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่อุดหนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Post Today, "Rain landslides in Pathum, Sathaphon village for the last 9 years, the cause of garbage clogged pipes," posttoday.com. <https://www.posttoday.com/social/local/628618>. (accessed: Sep. 15, 2021)
- [2] Thai Rath Online, "The rain does not drain quickly flooded the houses the reason is because the debris clogs the sewers" thairath.co.th. <https://www.thairath.co.th/news/local/central/122-4942>. (accessed: Sept. 22, 2021)
- [3] Handbook of Drainage system design and prevent erosion in highway work, Dept. of Highways, Bangkok, Thailand, 2011, pp.25–142.
- [4] Drainage system design according to Bangkok standards for small project areas at the housing estate, Dept. of Drainage and Sewerage, Bangkok, Thailand, 1992, pp. 1–15.
- [5] *Standard of Wastewater and Storm Drainage System*, Dept. of Local Administration, Bangkok, Thailand, 2012, pp. 17–26.
- [6] J. C. Y. Guo, "Design of grate inlets with a clogging factor," *Advances in Environmental Research*, vol. 4, no. 3, pp. 181–186, 2000, doi: 10.1016/S1093-0191(00)00013-7

- [7] J. C. Y. Guo, "Design of Street Curb Opening Inlets Using a Decay-Based Clogging Factor," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 132, no. 11, pp. 1240–1241, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1237).
- [8] M. Gómez, G. H. Rabasseda and B. Russo, "Experimental campaign to determine grated inlet clogging factors in an urban catchment of Barcelona," *Urban Water Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 50–60, 2012, doi: 10.1080/1573062X.2012.690435.
- [9] Autodesk Storm and Sanitary Analysis 2018 User's Guide, ADSK., San Rafael, CA, USA, 2017, pp. 244.
- [10] N. Inwong, "Discharge Forecasting in Yom and Nan Rivers by KUnet Artificial Neural Networks Program," M.S. Thesis, Dept. WRE., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2006.
- [11] Urban Drainage and Flood Control District Urban Storm Drainage Criteria Manual, 1st ed., UDFCD., Denver, CO, USA, 2017, pp. 7–28.
- [12] A. Rittima, K. Piemfa, N. Uthai and A. Jantaramana, "An Improvement of Design Rainfall Analysis of the Central Basin of Thailand," *Research and development journal*, vol. 24, no.4, pp. 28–38, 2013.
- [13] J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models; Part I-a discussion of principles," *Journal of Hydrology*, vol. 10, pp. 282–290, 1970, doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- [14] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith, "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations," *Transactions of the ASABE*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900, 2007, doi: 10.13031/2013.23153.
- [15] T. S. Hogue, S. Sorooshian, H. Gupta, A. Holz and D. Braatz, "A multistep automatic calibration scheme for river forecasting models," *Journal of Hydrometeorology*, vol. 1, no. 6, pp. 524–542, 2000.
- [16] B. M. Fiseha, S. G. Setegn, A. M. Melesse, E. Volpi and A. Fiori, "Hydrological analysis of the Upper Tiber River Basin, Central Italy: a watershed modelling approach," *Hydrological Processes*, vol. 27, no. 16, pp. 2339–2351, 2012, doi: 10.1002/hyp.9234.
- [17] S. A. Lottes, M. A. Sitek and N. Sinha, "Computational analysis of water film thickness during rain events for assessing hydroplaning risk Part 1: Nearly smooth road surfaces," NSED U.S. Dept. of Energy Labs., Argonne, IL, USA, Rep. ANL-20/36; 162558, 2020.
- [18] R. Veerappan and J. Le, "Hydraulic efficiency of road drainage inlets for storm drainage system under clogging effect." presented at the 5th Int. Conf. Flood Risk Management and Response, San Servolo, Italy, 2016, pp. 271–281, doi: :10.2495/UW160241.