การพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์การออกแบบท่อลอดถนน ในพื้นที่ทางหลวง

Development of a Program for Analyzing Road Culvert Design in Highway Area

จักรพงษ์ ธรรมทินโน[1,*] และ โกวิท บุญรอด[2]

[1] นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร จังหวัดสกลนคร

[2] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร จังหวัดสกลนคร

**Corresponding author; E-mail address: 47bronin@gmail.com*

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการระบายน้ำของท่อลอดถนน เนื่องจากค่าระดับน้ำ ค่าปริมาณน้ำท่าที่เพิ่มขึ้นมักเกินค่าที่ใช้ในการออกแบบตามมาตรฐานในอดีต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบท่อลอดถนนโดยใช้โปรแกรม MS Excel เพื่อให้สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ รองรับการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ การขยายความกว้างถนนและการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรอบ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นช่วยให้การออกแบบง่ายต่อการใช้งานและเหมาะสมกับสถานการณ์ปัจจุบัน การศึกษาประกอบด้วยการรวบรวมข้อมูลและการตรวจสอบประสิทธิภาพให้เป็นไปตามการออกแบบของมาตรฐานกรมทางหลวง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณขนาดและจำนวนของท่อลอดถนนได้อย่างแม่นยำ โดยผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับมาตรฐานกรมทางหลวง และสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายน้ำได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบเดิม ผลการศึกษานี้เป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับการปรับปรุงการออกแบบท่อลอดถนนให้เหมาะสมกับสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงในอนาคต และช่วยลดผลกระทบจากน้ำท่วมและการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในพื้นที่ศึกษาอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์, ระบายน้ำ, ท่อลอดถนน, ระดับน้ำ, ประสิทธิภาพการระบายน้ำ

Abstract

Climate change and land use alterations significantly impact the efficiency of road culvert drainage systems, as increased water level and runoff often exceeds the design capacities defined by past standards. This study aims to develop computer programs an analytical and design program for road culverts using MS Excel, enabling accurate and precise calculations that accommodate climate changes, road widening, and surrounding land use modifications. The developed program enhances usability and ensures suitability for current conditions. The study involves data collection and performance verification of culvert designs based on the design standards of the Department of Highways. The findings demonstrate that the developed program can accurately determine the size and quantity of road culverts and according to the standards of the Department of Highways. Additionally, the improved design enhances drainage performance compared to conventional methods. This research provides a crucial framework for optimizing road culvert designs to adapt to future environmental changes, mitigating of flood impact and promoting sustainable environmental management in the study area.

Keywords: computer programs development, drainage, culvert, water level, drainage efficiency.

1. คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเผชิญกับปัญหาอุทกภัยที่เกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การตัดไม้ทำลายป่า การขยายตัวของชุมชนเมือง โดยขาดแผนการระบายน้ำที่เหมาะสม และการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ส่งผลให้ปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้นเกินค่าที่ใช้ในการออกแบบเดิม ทำให้เกิดน้ำท่วมบนทางหลวงบางสาย ส่งผลกระทบต่อการสัญจรของประชาชน การก่อสร้างถนนของกรมทางหลวงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องมีแนวตัดขวางทางน้ำ การออกแบบก่อสร้างระบบระบายน้ำและอาคารระบายน้ำให้มีพื้นที่ช่องเปิดสำหรับการระบายน้ำอย่างเพียงพอต่อการระบายน้ำ ที่เกิดจากฝนตกหนักสูงสุดในคาบการเกิดซ้ำ (Return Period) ที่ใช้ในการออกแบบ เช่น 10 ปี 25 ปี หรือ 50 ปี เป็นต้น โดยการออกแบบดังกล่าวเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีในการออกแบบระบบระบายน้ำในงานทางหลวง (Highway Drainage) ซึ่งใช้กันเป็นสากล ถึงอย่างไรแม้การออกแบบระบบระบายน้ำในงานทางหลวงที่ผ่านมาจะได้ดำเนินการตามหลักวิศวกรรมแล้วก็ตาม อาจเนื่องจากปัจจุบันสภาพธรรมชาติ ภูมิประเทศ และภูมิอากาศได้มีการเปลี่ยนแปลงไปมาก ข้อมูลและหลักเกณฑ์บางอย่างที่กรมทางหลวงเคยใช้ในการออกแบบอาจไม่เหมาะสมกับสภาพปัจจุบัน จึงมีแนวคิดในการพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์การออกแบบท่อลอดถนน ซึ่งถือเป็นการประยุกต์การใช้โปรแกรมในการออกแบบท่อลอด เพื่อใช้เปรียบเทียบกับ

ทฤษฎีในการออกแบบระบบระบายน้ำตามขวาง โดยตัวโปรแกรมจะสามารถคำนวณหน้าตัดการไหลที่มีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่มากยิ่งขึ้น สร้างความสะดวกในการออกแบบท่อลอดที่รวดเร็วและถูกต้องเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกหน้าตัดท่อลอดการระบายน้ำได้อย่างเหมาะสมต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ข้อพิจารณาในการออกแบบท่อลอดถนน หรือท่อระบายน้ำเป็นท่อที่มีความยาวค่อนข้างสั้น ซึ่งใช้ในการระบายน้ำฝนผ่านถนน หรือผ่านคันดิน ท่อระบายน้ำทำหน้าที่เป็นช่องทางปิดที่เป็นส่วนต่อเนื่องจากช่องทางเปิดผ่านคันดิน อย่างไรก็ตาม การไหลผ่านท่อระบายน้ำขึ้นอยู่กับรูปทรงของทางเข้าและความลึกของการไหลทางด้านท้ายน้ำ ดังนั้น การคำนวณการไหลสำหรับท่อระบายน้ำจึงซับซ้อนกว่าการวิเคราะห์การไหลในช่องทางเปิดที่เกี่ยวข้องกับท่อหรือท่อระบายน้ำทั่วไป การออกแบบให้ระบายน้ำตามการออกแบบโดยไม่ล้นคันดินหรือทำให้เกิดน้ำขังจำนวนมากที่ปลายน้ำ ขั้นตอนสำหรับการออกแบบดังกล่าวเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีในการออกแบบระบบระบายน้ำในงานทางหลวง มีพื้นฐานมาจาก Hydraulic Design of Highway Culverts (Third Edition), FHWA-HIF-12-026 HDS5, 2012 [1]

2.1.1 อัตราการไหลสูงสุดที่ใช้ออกแบบ (Peak Discharge)

การศึกษานี้เลือกใช้วิธี Rational method สำหรับหาค่าอัตราการไหลสูงสุดที่ใช้ออกแบบ [2] กรณีที่พื้นที่รับน้ำขนาดไม่ใหญ่มาก (ไม่เกิน 25 ตารางกิโลเมตร) เพราะยิ่งพื้นที่รับน้ำมีขนาดใหญ่ การกระจายของฝนในพื้นที่รับน้ำก็ยิ่งแตกต่างกัน ความถูกต้องของการคำนวณก็จะยิ่งน้อยลง การคำนวณอัตราการไหลสูงสุดสามารถหาได้ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$Q_R = 0.278 \times 10^{-6} CIA \quad (1)$$

เมื่อ ค่า Q_R คือ อัตราการไหลสูงสุดของน้ำ ณ จุดที่พิจารณามีหน่วยเป็น m^3/s ค่า C คือสัมประสิทธิ์น้ำท่า (Coefficient of Runoff) ขึ้นกับลักษณะของพื้นที่รับน้ำฝน ค่า I คือ ความเข้มของฝน (Rainfall Intensity) มีหน่วยเป็น mm./hr. และค่า A คือ พื้นที่รับน้ำฝนมีหน่วยเป็น m^2 ได้จากการแบ่งพื้นที่รับน้ำฝนในแผนที่เส้นชั้นความสูง

ค่าความเข้มของฝนสามารถหาได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของฝน (Intensity) กับช่วงเวลาที่ฝนตก (Duration) ซึ่งมักจะถูกเรียกว่า IDF Curve [2] สร้างขึ้นจากการวิเคราะห์ความถี่การตกของฝน (Frequency Analysis) ที่ระดับความเข้มของฝนและช่วงเวลาที่ฝนตกต่าง ๆ ค่าตัวแปรที่ต้องทราบได้แก่ คาบการเกิดซ้ำของน้ำฝน (Return period) ที่ใช้ในการออกแบบ ช่วงเวลาการตกของฝน (Duration) ที่ใช้ในการคำนวณกำหนดให้เท่ากับช่วงเวลาที่น้ำฝนส่วนเกินที่ตกในพื้นที่รับน้ำไหลมารวมพร้อมกัน ณ จุดที่ตั้งของอาคารระบายน้ำที่พิจารณาออกแบบ (Time of Concentration) การศึกษานี้ใช้วิธีการคำนวณของ Kirpich [3] ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$T_C = 0.0078(L * 3.28)^{0.77} * S^{-0.358} \quad (2)$$

เมื่อ ค่า T_c คือ Time of Concentration มีหน่วยเป็น min. ค่า L คือ ความยาวตามลำน้ำสายใหญ่จากจุดไกลที่สุดบนสันปันน้ำถึงตำแหน่งที่พิจารณาออกแบบมีหน่วยเป็น m. ค่า S คือ ความลาดชันเฉลี่ยของพื้นที่ระหว่างระดับพื้นดินที่จุดไกลสุดบนสันปันน้ำกับระดับที่พิจารณาออกแบบ

การคำนวณอัตราการไหลสูงสุดโดยวิธี Rational Formula เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย แต่ความถูกต้องแม่นยำของการคำนวณขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการเลือกใช้ ค่าสัมประสิทธิ์ของน้ำท่าหรือค่า C ซึ่งเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำฝนที่รวมเป็นน้ำท่าไหลออกจากพื้นที่รับน้ำที่พิจารณา แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขของพื้นที่รับน้ำซึ่งขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างได้แก่ ความลาดเอียงของพื้นที่รับน้ำชนิดและความลึกของชั้นดิน ชนิดและความหนาแน่นของพืชปกคลุมดิน การใช้พื้นที่ (Land Used) การเก็บกักภายในพื้นที่รับน้ำ (surface storage) รวมทั้งความเข้มและความต่อเนื่องของฝน ดังนั้นจึงเป็นเรื่องค่อนข้างยากในการเลือกใช้ให้เหมาะสม [2] มีหลายหน่วยงานได้เสนอแนวทางในการเลือกใช้ทั้งในรูปแบบของกราฟและตาราง ค่า C ที่เสนอโดย Chow et al [4] จะมีการแบ่งคุณลักษณะของพื้นผิวพื้นที่รับน้ำฝนที่ละเอียดมากขึ้น ขึ้นอยู่กับรอบการเกิดซ้ำของฝนที่เลือกใช้ สภาพพื้นที่ภายในพื้นที่รับน้ำฝน มีความแตกต่างกัน เช่น ความลาดชัน ชนิดของดิน การใช้พื้นที่และพืชปกคลุม ควรแบ่งพื้นที่รับน้ำฝนเป็นพื้นที่ย่อย A_i ค่า C เฉลี่ยของพื้นที่รับน้ำทั้งหมด n ได้จากการเฉลี่ยค่า C_i ของพื้นที่ย่อยตามน้ำหนักขนาดของพื้นที่ย่อย ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i A_i}{A_{Total}} = \frac{C_1A_1 + C_2A_2 + \ldots + C_nA_n}{A_{Total}} \quad (3)$$

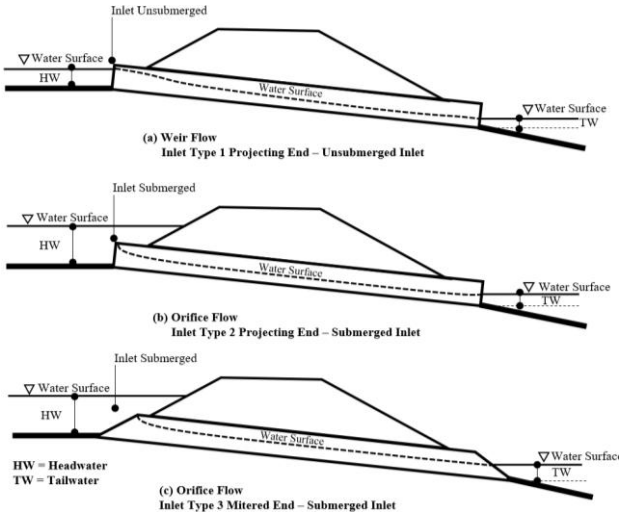
2.1.2 ประเภทของการควบคุมการไหล (Type of Flow Control)

การไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางเข้าและการควบคุมระดับน้ำทางออก มีลักษณะการไหลของน้ำที่เต็มท่อและไม่เต็มท่อก็ได้ ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านท่อ ระบบการไหลสภาวะวิกฤต สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตและสภาวะเหนือจุดวิกฤต มีความสำคัญในการกำหนดตำแหน่งของส่วนควบคุมการไหลและประเภทของการควบคุมการไหล [1] สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางเข้า (Inlet Control) และการไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางออก (Outlet Control)

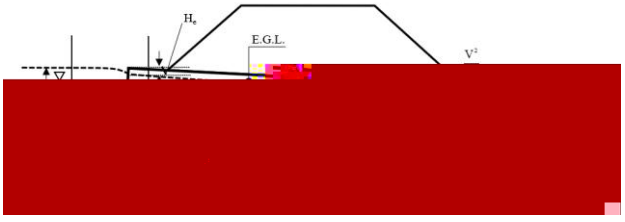
2.1.2.1 การไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางเข้า (Inlet Control) ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านท่อลอดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพที่ทางเข้าเท่านั้น เช่น ระดับน้ำเหนือทางเข้าท่อลอด ลักษณะของปากท่อลอด เป็นต้น ส่วนความลาดชันของท่อลอด ความยาวท่อลอด ความขรุขระของผิวท่อลอด ระดับน้ำที่ปลายท่อลอด หรือองค์ประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ถัดจากปากท่อลอดเข้ามา ไม่ส่งผลทำให้อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง

- การไหลแบบข้ามฝาย (Weir Flow) พิจารณาระดับน้ำทางเข้าปากท่อจะไม่สูงท่วมปากท่อ ดังรูปที่ 1 (a) และความลาดชันของท่อจะเป็นแบบมีความลาดชันมาก (Steep Slope) คือ ความลาดชันที่ทำให้การไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow) เป็นแบบการไหลสภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Flow) ความลาดชันนี้จะมีค่ามากกว่าความลาดชันสภาวะวิกฤติ (Critical Slope) ซึ่งเป็นความลาดชันที่ทำให้เกิดการไหลแบบสภาวะวิกฤต (Critical Flow) สำหรับการไหลชนิดนี้ สมการที่ใช้คำนวณหาปริมาณน้ำไม่มีรูปแบบแน่นอนเหมือนแบบการไหลผ่านรูเปิด (Orifice Flow) แต่จะขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดของท่อด้วย ลักษณะการไหลแบบ Inlet Control น้ำจะไหลไม่เต็มท่อ ท่อมีลักษณะความลาดชันมาก และระดับน้ำทางออกปลายท่อ (Tailwater) จะไม่สูงท่วมหลังท่อ

- การไหลผ่านรูเปิด (Orifice Flow) พิจารณาระดับน้ำทางเข้า (Headwater) อยู่สูงกว่าระดับหลังท่อ ดังรูปที่ 1 (b) และรูปที่ 1 (c) แต่น้ำที่ไหลเข้าท่อจะไหลได้ไม่เต็มท่อ ลักษณะการไหลของน้ำเหมือนกับการไหลผ่านรูเปิด (Orifice) หรือไหลลอดใต้บานประตู ระบายน้ำ (Sluice gate) จึงเรียกว่า Orifice flow สำหรับท่อลอดแบบกลม (Pipe Culvert) และท่อลอดแบบสี่เหลี่ยม (Box Culvert)



รูปที่ 1 การไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางเข้า (Inlet Control) [5]



รูปที่ 2 รูปตัดเส้นพลังงานการไหล สำหรับการไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางเข้า (Inlet Control) [1]

สมการสำหรับการไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางเข้า (Inlet Control) [5] กรณีระดับน้ำทางเข้าปากท่อไม่สูงท่วมปากท่อ (Unsubmerged) ณ ตำแหน่งหน้าตัดที่ 1 ดังรูปที่ 2 และดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\frac{HW_i}{D} = \frac{H_c}{D} + K\left(\frac{K_u Q}{AD^{0.5}}\right)^2 + K_S S \qquad (4)$$

กรณีระดับน้ำทางเข้าปากท่อไม่สูงท่วมปากท่อ (Unsubmerged) ณ ตำแหน่งหน้าตัดที่ 2 ดังรูปที่ 2 และดังแสดงในสมการที่ (5)

$$\frac{HW_i}{D} = K\left(\frac{K_u Q}{AD^{0.5}}\right)^2 \qquad (5)$$

กรณีระดับน้ำทางเข้าปากท่อสูงท่วมปากท่อ (Submerged) ดังรูปที่ 2 และดังแสดงในสมการที่ (6)

$$\frac{HW_i}{D} = c\left(\frac{K_u Q}{AD^{0.5}}\right)^2 + Y + K_S S \qquad (6)$$

ตารางที่ 1 ค่าคงที่สำหรับการคำนวณการไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางเข้า (Inlet Control) สำหรับท่อลอดแบบสี่เหลี่ยม (Box Culvert) [5]

Nomograph Scale	Wingwall Flare Type	K	c	Y
Inlet Type [1]	30° – 75°	0.0260	0.0347	0.8100
Inlet Type [2]	90°	0.0610	0.0400	0.8000
Inlet Type [3]	0°	0.0610	0.0423	0.8200

ตารางที่ 2 ค่าคงที่สำหรับการคำนวณการไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางเข้า (Inlet Control) สำหรับท่อลอดแบบท่อกลม (Pipe Culvert) [5]

Nomograph Scale	Wingwall Flare Type	K	c	Y
Inlet Type [1]	Headwall Square Edge	0.0098	0.0398	0.67
Inlet Type [2]	Headwall Socket End	0.0018	0.0292	0.74
Inlet Type [3]	Projecting Socket End	0.0045	0.0317	0.69

เมื่อ HW_i คือ ความสูงของระดับผิวน้ำที่ปากทางเข้าของท่อลอด เทียบกับระดับธรณีปากท่อ ในกรณีของการควบคุมระดับน้ำทางเข้า (Headwater depth of Inlet Control ในหน่วยเมตร (m.)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของลอดแบบกลมหรือความลึกหน้าตัด (Section depth) ของท่อลอดแบบสี่เหลี่ยม ในหน่วยเมตร (m.)

K, c, Y คือ ค่าคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 1 ตารางที่ 2

Ku คือ ค่าตัวเลขสำหรับแปลงหน่วย โดยมีค่าเท่ากับ 1.811 สำหรับระบบหน่วยสากล (SI unit)

Q คือ อัตราการไหลผ่านท่อลอด ในหน่วยลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (m^3/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดเต็มของท่อลอด (Full cross-sectional area of culvert barrel) ในหน่วยตารางเมตร (m^2)

K_s คือ ค่าปรับแก้ความลาดชัน (Slope correction) ของท่อลอด โดยมีค่าเท่ากับ -0.5 และ 0.7 สำหรับท่อลอดแบบกลมและท่อลอดแบบสี่เหลี่ยม ตามลำดับ

S คือ ความลาดชันของท่อลอด (Culvert barrel slope)

2.1.2.2 การไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางออก (Outlet Control) ความเร็วของการระบายน้ำทางออกจะต่ำกว่าการระบายน้ำทางเข้า ปริมาณการไหลจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายชนิดด้วยกัน เช่น ความลาดชันของท่อลอด ความขรุขระของผิวท่อลอด ความแตกต่างของระดับน้ำปากท่อลอดกับปลายท่อลอด และลักษณะของปากท่อลอด เป็นต้น สามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ [2] คือ

- การไหลแบบน้ำเต็มท่อ (Full Pipe Flow) การไหลนี้น้ำจะเต็มท่อลอด แรงดันของน้ำภายในท่อลอดจะสูงกว่าความดันบรรยากาศ ที่ปากท่อลอดระดับน้ำจะสูงกว่าขอบบนของท่อลอด แต่ที่ปลายท่อลอดระดับน้ำอาจจะท่วมหลังท่อลอด ดังรูปที่ 3 (a) หรือไม่ท่วมหลังท่อ ดังรูปที่ 3 (b)

- การไหลแบบน้ำไม่เต็มท่อ (Partly Full Flow) การไหลลักษณะนี้ความลาดชันของท่อจะต้องเป็นแบบลาดชันน้อย (Mild Slope) ซึ่งจะมีค่าชันน้อยกว่าความลาดชันในสภาวะการไหลแบบวิกฤติ (Critical Slope) การไหลบน Mild Slope นี้จะเป็นแบบสภาวะการไหลแบบใต้วิกฤติ (Subcritical Flow) และปากท่อลอดจะไม่จม (Submerged) ใต้ระดับน้ำ สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรก ระดับท้ายน้ำสูงกว่าระดับความลึกวิกฤติ (Critical Depth) ก่อนถึงปลายท่อ ดังรูปที่ 4 (a) การไหลจะเป็นแบบสภาวะการไหลใต้วิกฤติ (Subcritical Flow) ตลอดความยาวท่อ อีกประเภทหนึ่ง ดังรูปที่ 4 (b) ระดับท้ายน้ำอยู่ต่ำกว่าระดับความลึกวิกฤติ โดยระดับน้ำจะโค้งต่ำ ตรงปลายท่อ และจะมีหน้าตัดหนึ่งจะมีความลึกของน้ำเท่ากับความลึกวิกฤติพอดี

รูปตัดเส้นพลังงานการไหลของน้ำ ผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางออก (Outlet Control) [5] ดังรูปที่ 5

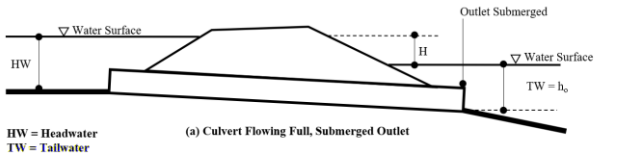
สำหรับการคำนวณค่าความสูงระดับน้ำ (Headwater depth) [5] ที่ปากทางเข้าของท่อลอดเทียบกับระดับธรณีปากท่อ ในกรณีของการควบคุมระดับน้ำทางออก (Outlet Control) ดังแสดงในสมการที่ (7)

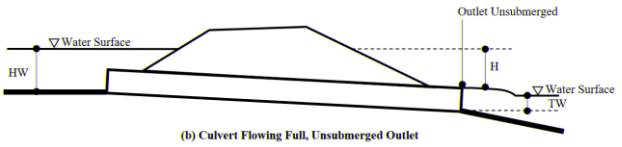
$$HW_o = h_o + H - Ls \tag{7}$$

ค่าระดับความลึกวิกฤต (critical depth) สำหรับท่อลอดแบบกลมและท่อลอดแบบสี่เหลี่ยม สามารถคำนวณได้ ดังแสดงในสมการที่ (8) และสมการที่ (9) ตามลำดับ

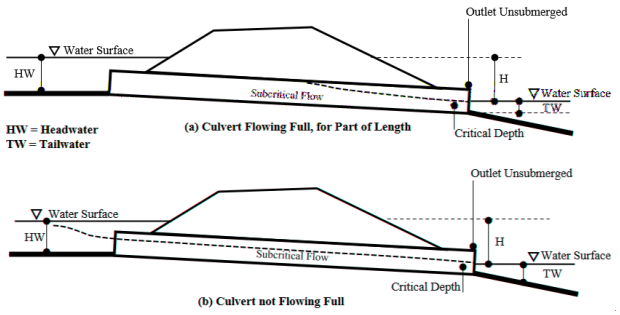
$$h_c = \frac{CQ^{1.5}}{D^{0.25}} \tag{8}$$

$$h_c = \frac{C.Q^{\frac{2}{3}}}{B}$$

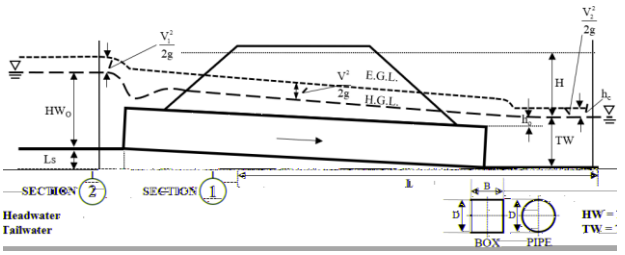




รูปที่ 3 การไหลแบบน้ำเต็มท่อ (Full Pipe Flow) [5]



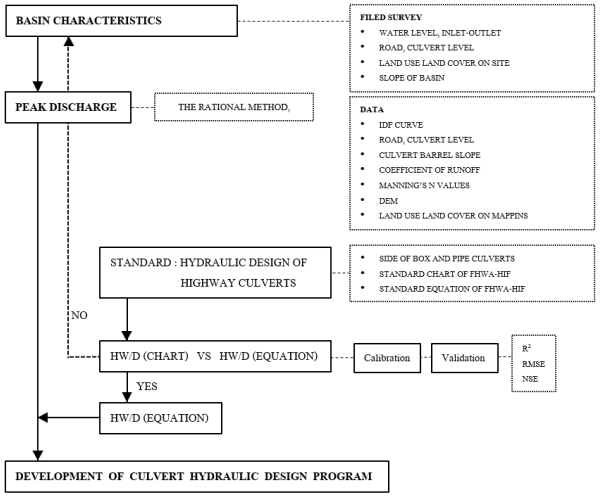
รูปที่ 4 การไหลแบบน้ำไม่เต็มท่อ (Partly Full Flow) [5]



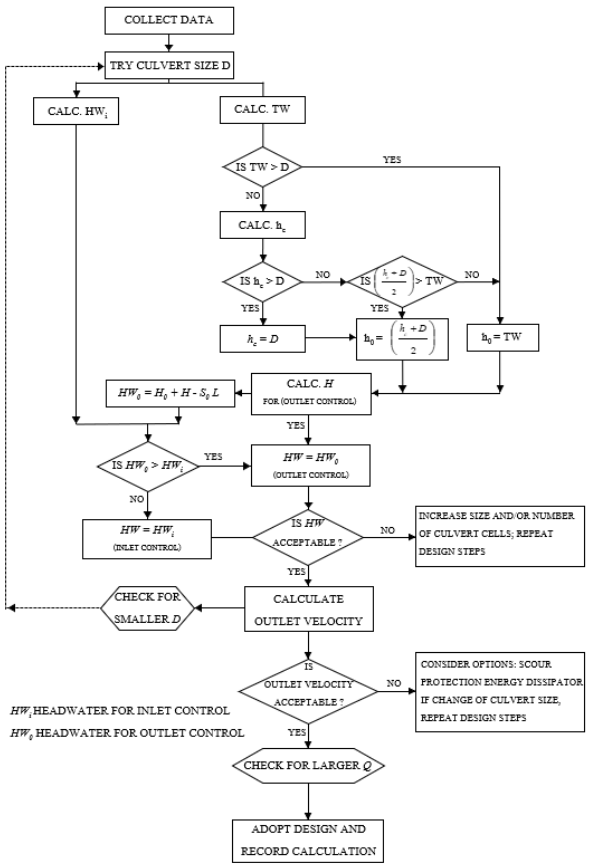
รูปที่ 5 รูปตัดเส้นพลังงานการไหล สำหรับการไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมทางออก (Outlet Control) [1]

2.2 กรอบแนวคิดในการศึกษา

การพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์การออกแบบท่อลอดถนน ในพื้นที่ทางหลวง เพื่อเป็นแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำผ่านถนน แก้ไขปัญหาน้ำท่วมในเขตทาง ขั้นตอนการศึกษาเริ่มต้นด้วย ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่รับน้ำ ในพื้นที่เขตทางหลวงที่ประสบปัญหาภัยพิบัติด้านอุทกภัย หรือในพื้นที่ที่เกิดน้ำท่วมซ้ำซาก ประกอบด้วย ค่าระดับน้ำท่วมเหนือน้ำทางเข้าท่อลอดและค่าระดับน้ำท่วมระดับท้ายน้ำทางออกท่อลอด ข้อมูลระดับความสูงของผิวถนน ระดับความสูงที่ปากทางเข้าของท่อลอด ระดับความสูงธรณีปากท่อ และแบบมาตรฐานกรมทางหลวง ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลลักษณะสิ่งปกคลุมดิน และข้อมูลความลาดชันของพื้นที่รับน้ำ ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าอัตราการไหลสูงสุดเพื่อใช้ออกแบบ การศึกษานี้เลือกใช้วิธี Rational method ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วยข้อมูลโค้งความสัมพันธ์ IDF-curve ในพื้นที่ศึกษา ขั้นตอนที่ 3 ทำการเลือกวิธีคำนวณระหว่างค่า HW/D (CHART) ซึ่งได้จากการอ่านผลจากกราฟ และ HW/D (EQUATION) ได้จากการใช้สมการที่ (6) คำนวณหาค่า จากนั้นทำการปรับเทียบค่า (Calibration) และยืนยันการปรับเทียบค่า (Validation) ด้วยวิธี R^2 RMSE และ NSE ขั้นตอนสุดท้าย เมื่อผลจากการใช้สมการ HW/D (EQUATION) มีความเชื่อมั่น นำไปพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การออกแบบท่อลอดถนน โดยใช้โปรแกรม MS Excel ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนการศึกษาการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การออกแบบท่อลอดถนน

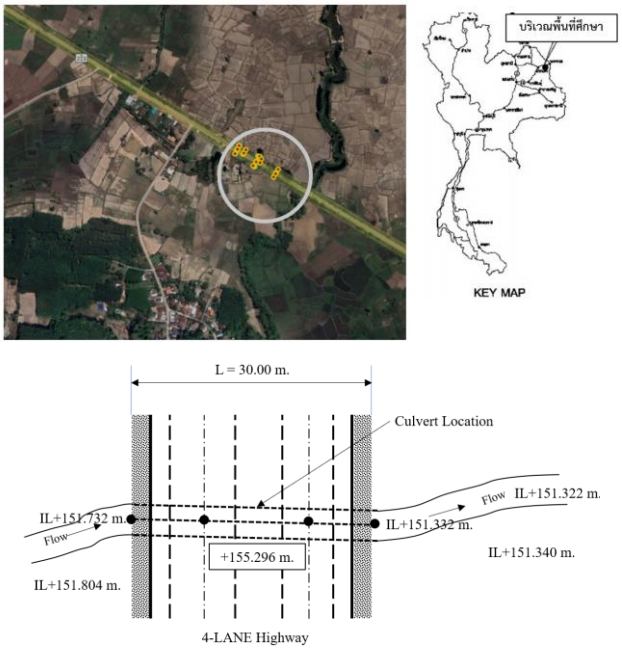


รูปที่ 7 แผนผังการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การออกแบบท่อลอดถนน [5]

ขั้นตอนการคำนวณโดยการใช้โปรแกรมเปรียบเทียบกับกราฟค่ามาตรฐานจาก Hydraulic Design of Highway Culverts (Third Edition), FHWA-HIF-12-026 HDS5, 2012 [1] การคำนวณท่อลอด ต้องใช้การอ้างอิงกราฟที่ซับซ้อนเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ เพื่อลดความยุ่งยาก การพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์การออกแบบท่อลอดถนน เพื่อใช้เป็นมาตรฐานร่วมกับการใช้กราฟและการใช้สมการ ดังรูปที่ 7

2.3 พื้นที่ศึกษา

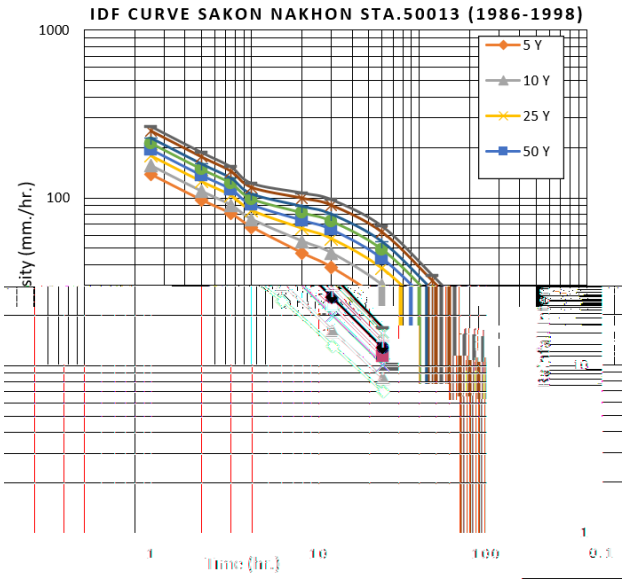
การสำรวจพื้นที่ศึกษาและข้อมูลที่ใช้ ทำการเลือกพื้นที่ศึกษาในเขตความรับผิดชอบของกรมทางหลวง บนถนนทางหลวงหมายเลข 223 สายสกลนคร – อำเภอนาแก พิกัด 48Q 436846.216 E, 1877213.418 N ช่วงวัดนาคนิมิตต์ ถึง อำเภอธาตุพนม ดังรูปที่ 8 การลงพื้นที่สำรวจ ดังรูปที่ 9 และข้อมูลโค้งความสัมพันธ์ IDF-curve (ปี ค.ศ. 1986 ถึง 1998) รหัสสถานี 50013 อ.เมือง จ.สกลนคร [6] ดังรูปที่ 10



รูปที่ 8 พื้นที่ศึกษาถนนทางหลวงหมายเลข 223 สายสกลนคร-อำเภอนาแก



รูปที่ 9 สำรวจภาคสนาม พื้นที่ศึกษาถนนทางหลวงหมายเลข 223 สายสกลนคร-อำเภอนาแก พิกัด 48Q 436846.216 E, 1877213.418 N



รูปที่ 10 โค้งความสัมพันธ์ IDF-curve (ปี ค.ศ. 1986 ถึง 1998) รหัสสถานี 50013 อ.เมือง จ.สกลนคร [6]

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ค่าอัตราการไหลสูงสุดที่ใช้ออกแบบ (Peak Discharge)

จากขั้นตอนการศึกษาการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การออกแบบท่อลอดถนน ดังรูปที่ 6 ผลจากการลงสำรวจพื้นที่ เพื่อเก็บข้อมูลพิกัด ตำแหน่งของท่อลอดถนน ประเภทท่อลอด ขนาด จำนวน ค่าระดับที่ตำแหน่งต่าง ๆ และลักษณะสิ่งปกคลุมดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน ในบริเวณพื้นที่รับน้ำ นำมาคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการไหลสูงสุดที่ใช้ออกแบบ โดยได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณอัตราการไหลสูงสุดที่ใช้ออกแบบ

Watershed Area	5,020,454 m^2
Return period, T	50 years
Coefficient of Runoff, $C_{average}$	0.25
Time of Concentration, Tc	60.98 minutes
Slope	0.0133
Rainfall Intensity, I	85 mm/hr.
Peak Discharge, Q_R	29.53 m^3/s

3.2 ผลการปรับเทียบค่า (Calibration) ระหว่าง HW/D (CHART) และ HW/D (EQUATION)

สำหรับการพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์และออกแบบท่อลอดถนน ต้องทำการปรับเทียบระหว่างค่า HW/D (CHART) ซึ่งได้จากการอ่านผลจากกราฟ และ HW/D (EQUATION) ที่ได้จากการใช้สมการที่ (6) คำนวณหาค่า ซึ่งโดยทั่วไปการคำนวณออกแบบท่อลอดถนน นิยมใช้การอ่านผลจากกราฟ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนที่แตกต่างจากการ

คำนวณที่ให้ค่าที่แม่นยำ การปรับเทียบค่า (Calibration) เพื่อใช้ประเมินการตัดสินใจเลือกใช้วิธี คือ ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) [7] ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) หมายถึงสัดส่วนที่ตัวแปรอิสระ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลง ของตัวแปรตาม Y ได้ โดย R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้าค่า R^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่า X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y ได้มาก ถ้าค่า R^2 เข้าใกล้ 0 แสดงว่า X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y ได้น้อย ดังสมการที่ (12) การประเมินความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error, RMSE) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยแบบมีน้ำหนัก ค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y ได้มาก ดังสมการที่ (13) และการประเมินความแม่นยำ (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE) แสดงค่าความแม่นยำเชิงเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริง ค่าใกล้ 1 ดีมาก ถ้าค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 มีความคลาดเคลื่อนสูง ดังสมการที่ (14) และการแปลความหมาย R^2 RMSE และ NSE แสดงในตารางที่ 5

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}[(Y-\overline{Y})(X-\overline{X})]}{[\sum_{i=1}^{n}(Y-\overline{Y})^2]^{0.5}\,[\sum_{i=1}^{n}(X-\overline{X})^2]^{0.5}} \right]^2 \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y-X)^2}{n}} \quad (13)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Y-X)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y-\overline{Y})^2} \quad (14)$$

ตารางที่ 5 การแปลความหมาย R^2 RMSE และ NSE

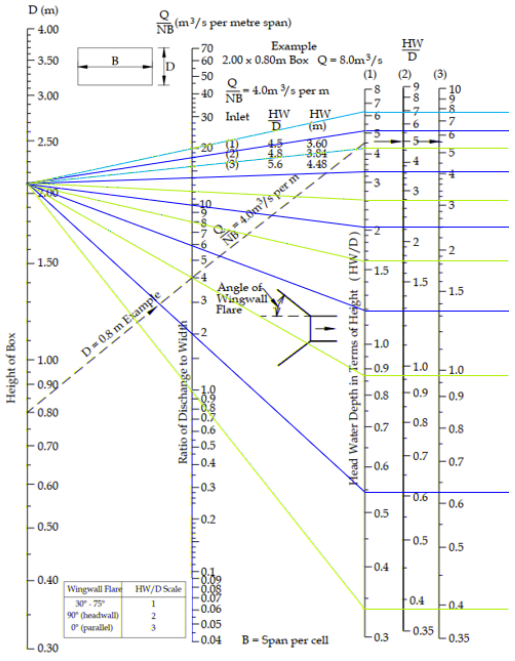
ตัวชี้วัด	ดี	ปานกลาง	ต่ำ
R^2	$0.80<R^2\leq1.00$	$0.60<R^2\leq0.80$	$R^2< 0.6$
RMSE	$0.00\leq RMSE\leq0.50$	$0.05\leq RMSE\leq0.70$	RMSE>0.70
NSE	$0.75<NSE\leq1.00$	$0.50<NSE\leq0.75$	$NSE\leq0.50$

ผลคำนวณการปรับเทียบค่า (Calibration) ระหว่างค่า HW/D (CHART) ซึ่งได้จากการอ่านผลจากกราฟ ดังรูปที่ 11 และ HW/D (EQUATION) แสดงในตารางที่ 6 สำหรับการไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบ

ตารางที่ 6 ผลคำนวณระหว่างค่า HW/D (CHART) และ HW/D (EQUATION)

Q (m^3/s)	Q/(N*B)	Inlet Type [1] HWi/D		Inlet Type [2] HWi/D		Inlet Type [3] HWi/D	
		Equation	Chart	Equation	Chart	Equation	Chart
0	0	0	0	0	0	0	0
2.1	1	0.832	0.340	0.823	0.370	0.844	0.390
4.2	2	0.868	0.550	0.866	0.610	0.889	0.630
8.4	4	1.016	0.870	1.036	0.960	1.069	0.980
12.6	6	1.262	1.200	1.319	1.300	1.369	1.320
16.8	8	1.606	1.610	1.716	1.720	1.788	1.800
21	10	2.048	2.050	2.226	2.230	2.327	2.400
25.2	12	2.589	2.590	2.849	2.850	2.986	3.100
29.4	14	3.228	3.250	3.586	3.600	3.765	4.100
33.6	16	3.965	4.200	4.436	4.700	4.664	5.200
37.8	18	4.801	5.200	5.399	5.600	5.683	6.300
42	20	5.735	6.300	6.476	7.000	6.821	7.900

การควบคุมระดับน้ำทางเข้า (Inlet Control) ท่อลอดแบบสี่เหลี่ยม (Box Culvert) Size 2.10 m. x 2.10 m. จำนวน 1 ช่องทางการไหล ความลาดชันของท่อลอด เท่ากับ 0.0133 คำนวณหาค่า HW/D ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน ได้ผลการปรับเทียบค่า (Calibration) ด้วยวิธี R^2 RMSE และ NSE แสดงในตารางที่ 7 และกราฟแสดงผลการปรับเทียบค่า (Calibration) ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ค่า HW/D (CHART) ซึ่งได้จากการอ่านผลจากกราฟ สำหรับท่อลอดแบบสี่เหลี่ยม (Box Culvert) Size 2.10 m. x 2.10 m.

ตารางที่ 7 ผลการปรับเทียบค่า (Calibration) ด้วยวิธี R^2 RMSE และ NSE

Inlet Type	R^2	RMSE	NSE
Inlet Type [1]	0.9947	0.2742	0.9739
Inlet Type [2]	0.9961	0.2350	0.9853
Inlet Type [3]	0.9965	0.4326	0.9554

รูปที่ 12 การปรับเทียบค่า (calibration) ระหว่าง HW/D (CHART) และ HW/D (EQUATION)

3.3 ผลการยืนยันการปรับเทียบค่า (Validation) ระหว่าง HW/D (CHART) และ HW/D (EQUATION)

ผลจากการปรับเทียบค่า (calibration) ที่ได้ยังไม่สามารถประเมินได้ทันทีว่าเหมาะสมหรือไม่ ก่อนที่จะใช้วิธีสมการ (EQUATION) เพื่อไปพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์และออกแบบท่อลอดถนน จึงต้องทำการยืนยันการปรับเทียบค่า (Validation) สำหรับการไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบการควบคุมระดับน้ำทางเข้า (Inlet Control) โดยเลือกใช้ท่อลอดแบบสี่เหลี่ยม (Box Culvert) Size 2.40 m. x 2.40 m. จำนวน 1 ช่องทางการไหล ความลาดชันของท่อลอด เท่ากับ 0.0133 คำนวณหาค่า HW/D ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน ได้ผลการปรับเทียบค่า (Calibration) ด้วยวิธี R^2 RMSE และ NSE แสดงในตารางที่ 8 และกราฟแสดงผลการปรับเทียบค่า (Calibration) ดังรูปที่ 13

ตารางที่ 8 ผลการปรับเทียบค่า (Calibration) ด้วยวิธี R^2 RMSE และ NSE

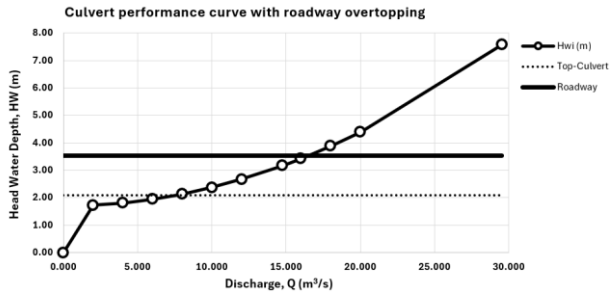
Inlet Type	R^2	RMSE	NSE
Inlet Type [1]	0.9873	0.2330	0.9603
Inlet Type [2]	0.9913	0.1819	0.9813
Inlet Type [3]	0.9916	0.2780	0.9608

รูปที่ 13 การยืนยันการปรับเทียบค่า (Validation), ระหว่าง HW/D (CHART) และ HW/D (EQUATION)

3.4 ผลการพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์และออกแบบท่อลอดถนน

การพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์และออกแบบท่อลอดถนนโดยใช้โปรแกรม MS Excel สร้างการคำนวณตามขั้นตอน ดังรูปที่ 6 เพื่อให้สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ จึงใช้วิธีการคำนวณโดยใช้สมการแทนการอ่านค่าจากกราฟ จากเดิมการออกแบบใช้วิธีการอ่านค่า HW/D เพื่อนำไปคำนวณหาค่า HW คือ ความสูงของระดับผิวน้ำที่ปากทางเข้าของท่อลอด เทียบกับระดับธรณีปากท่อ ดังแสดงในรูปที่ 14 เป็นตัวอย่างการคำนวณ Box Culvert (Inlet Control) Size 2.10

จากรูปที่ 15 แสดงค่าความลึกของระดับน้ำที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน



รูปที่ 13 ความลึกของระดับน้ำที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน สำหรับ Box Culvert (Inlet Control) Size 2.10 m. x 2.10 m. จำนวน 2 ช่องทางการไหล

4. บทสรุป

การพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์และออกแบบท่อลอดถนนโดยใช้โปรแกรม MS Excel เพื่อให้สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ พิจารณาการขยายความกว้างถนนและการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรอบ การศึกษานี้เป็นการนำเสนอการออกแบบท่อลอดถนน เป็นตัวอย่างที่ได้จากการลงสำรวจในพื้นที่จริง ถนนทางหลวงหมายเลข 223 สายสกลนคร-อำเภอนาแก พิกัด 48Q 436846.216 E, 1877213.418 N คำนวณหาปริมาณน้ำท่วมสูงสุด ด้วยวิธี Rational Formula ได้อัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 29.53 m^3/s ที่คาบการเกิดซ้ำ 50 ปี บนพื้นที่รับน้ำ 5,020,454 m^2 พบว่าค่าการออกแบบท่อลอดถนน Box Culvert (Inlet Control) ใช้ขนาดช่องเปิดภายใน กว้าง 2.10 m. สูง 2.10 m. ความยาวท่อ 30 m. จำนวน 2 แถว (ช่องทางการไหล) สามารถระบายน้ำได้ ภายใต้เงื่อนไข Inlet Control Box Culvert, Wingwall Flare90° Inlet Type 2 อัตราการไหลเท่ากับ 14.765 m^3/s ระดับน้ำทางเข้าสูงสุดอยู่ที่ +154.932 msl. ระดับหลังพื้นผิวถนน อยู่ที่ +155.296 msl. ระดับน้ำทางออกสูงสุดอยู่ที่ +153.582 msl. ที่ความเร็วการไหลในท่อเท่ากับ 6.374 m/s เมื่อนำผลการคำนวณไปตรวจสอบประสิทธิภาพตามมาตรฐานการออกแบบกรมทางหลวงร่วมกับการอ่านค่าจากวิธีกราฟ พบว่า ให้ค่าความเชื่อมั่นด้วยวิธี R^2 RMSE และNSE สำหรับประเภท Inlet Type [2] เท่ากับ 0.9961, 0.2350 และ0.9853 ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณขนาดและจำนวนของท่อลอดถนนได้อย่างแม่นยำ โดยผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับมาตรฐานกรมทางหลวง และสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายน้ำได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบเดิม สำหรับกรณีในพื้นที่ศึกษานี้ หากมีค่าอัตราการไหลที่สูงกว่าการออกแบบ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ หรือการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ควรเสนอแนะให้เพิ่มช่องทางการไหล

ผลการศึกษานี้เป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับการปรับปรุงการออกแบบท่อลอดถนนให้เหมาะสมกับสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงในอนาคต โดยเฉพาะที่ค่าอัตราการไหลต่าง ๆ กัน หรือกรณีที่ค่าอัตราการไหลที่สูงกว่าการออกแบบ และช่วยลดผลกระทบจากน้ำท่วมและการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในพื้นที่ศึกษาอย่างยั่งยืนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร สาขาวิศวกรรมโยธา และอาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลในด้านต่าง ๆ และการให้ข้อเสนอแนะระหว่างการดำเนินงาน เพื่อให้การพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์การออกแบบท่อลอดถนน ในพื้นที่ทางหลวง เกิดการพัฒนาและมีความสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] James D. Schall, Philip L. Thompson, Steve M. Zerges, Roger T. Kilgore, & Johnny L. Morris (2012), Hydraulic Design of Highway Culverts, Technical Report, Third Edition, Hydraulic Design Series Number 5. Publication No. FHWA-HIF-12-026.

[2] สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง (2553). คู่มือการออกแบบอาคารระบายน้ำ และป้องการการกัดเซาะในงานทางหลวง. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

[3] Kirpich, Z. P. (1940) Time of concentration of small agricultural watersheds. Journal of Civil Engineering, 10(6), 362.

[4] Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill, New York, NY.

[5] Urban Storm Water Management Manual for Malaysia (2000). Department of Irrigation and Drainage Malaysia. Percetakan Nasional Malaysia Berhad.

[6] กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2544). ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มฝน - ช่วงเวลา - ความถี่ฝนและเปอร์เซ็นต์การแผ่กระจายของปริมาณฝนสูงสุดในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.

[7] วราวุธ วุฒิวณิชย์ .2553.การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ Nash-Sutcliffe Efficiency และ R^2 .วันชูชาติ. สมาคมนิสิตเก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์. 4 มกราคม 2553. น.1-10