ระบบคำนวณการเปิดบานอาคารชลประทานแบบ Fuzzy Hybrid เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบริหารจัดการน้ำและรองรับการควบคุมระยะไกลแบบ Digital Twin: กรณีศึกษา โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบรมธาตุ จังหวัดชัยนาท

Fuzzy Hybrid-Based Gate Opening Calculation System for Improving Irrigation Water Management Accuracy and Supporting Digital Twin Remote Control: A Case Study of Boromthat Irrigation Project, Chainat Province

วิชญ์ ศรีวงษา[1*], วราวุธ วุฒิวณิชย์[2] และสมชาย ดอนเจดีย์[3]

[1] **คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จังหวัดนครปฐม, ประเทศไทย**

[2] **คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จังหวัดนครปฐม, ประเทศไทย**

[3] **คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จังหวัดนครปฐม, ประเทศไทย**

Email: dr.vich@gmail.com

บทคัดย่อ

ระบบคำนวณการเปิดบานระบายน้ำสำหรับอาคารชลประทานหลัก 5 แห่งในเขตโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบรมธาตุ จังหวัดชัยนาท โดยประยุกต์ใช้ Fuzzy Logic ร่วมกับสมการทางชลศาสตร์ในรูปแบบ Fuzzy Hybrid Model เพื่อจัดการกับความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำ (Cs) แบบจำลองพัฒนาด้วยไลบรารี Scikit-Fuzzy ในภาษา Python โดยใช้ความต่างระดับน้ำและอัตราการไหล (Q) ให้ผลลัพธ์เป็นค่า Cs เพื่อนำไปใช้ในสมการการไหลแบบท่วมท้ายบาน คำนวณระยะเปิดบานต่อหนึ่งช่อง ข้อมูลที่ใช้โดยให้คนอ่าน-พิมพ์จากรายงานผ่าน Facebook ของโครงการในช่วงปี พ.ศ. 2567–2568 ประกอบด้วยระดับน้ำเหนือน้ำ-ท้ายน้ำ อัตราการไหล และระยะเปิดบานจริง รวมจำนวน 547 records ผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองสามารถคำนวณระยะเปิดบานได้ใกล้เคียงค่าที่ใช้งานจริง โดยมีค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0126–0.0227 เมตร และค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.7719–0.9816 ค่า Cs อยู่ในช่วง 0.10–0.40 ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมการไหลจริงได้ดีกว่าการใช้ค่า Cs คงที่ ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจัดการน้ำและรองรับการควบคุมระยะไกลแบบ Digital Twin

คำสำคัญ : Fuzzy Logic, Hydraulic Gate, Digital Twin, Irrigation Control, Gate Opening

Abstract

This study presents a gate opening calculation system for five major irrigation structures in the Borommathat Operation and Maintenance Project, Chainat Province. The system integrates Fuzzy Logic with hydraulic equations in a hybrid fuzzy model to address uncertainty in the discharge coefficient (Cs). The model was developed in Python using the Scikit-Fuzzy library, with water level difference and discharge (Q) as input variables and the flow coefficient (Cs) as the output. The predicted Cs is then applied to the submerged gate flow equation to determine the gate opening for each bay. A total of 547 records were manually collected from operational reports published on the project's Facebook page during 2024–2025. The dataset includes upstream and downstream water levels, discharge, and actual gate openings. Results show that the model

estimates gate openings close to actual operations, with RMSE values ranging from 0.0126–0.0227 m and R^2 values from 0.7719–0.9816. The adaptive Cs range of 0.10–0.40 better represents real flow behavior than a constant coefficient. It also supports improved irrigation management and Digital Twin–based remote control systems.

Keywords : Fuzzy Logic, Hydraulic Gate, Digital Twin, Irrigation Control, Gate Opening

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การบริหารจัดการน้ำในระบบชลประทานจำเป็นต้องควบคุมอัตราการไหลผ่านอาคารระบายน้ำให้สอดคล้องกับความต้องการใช้น้ำในพื้นที่เพาะปลูก โดยการกำหนดระยะเปิดบานประตูระบายน้ำ (Gate Opening) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อปริมาณน้ำที่ส่งเข้าสู่ระบบคลองส่งน้ำ

โดยทั่วไปการคำนวณอัตราการไหลผ่านอาคารชลประทานใช้สมการชลศาสตร์ ซึ่งต้องอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำ (Discharge Coefficient, Cs) อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวมีความผันแปรตามระดับน้ำ สภาพการไหล และสภาพอาคาร ทำให้การใช้ค่าคงที่เพียงค่าเดียวอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ

2.วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือทำ Fuzzy Hybrid Hydraulic Model ซึ่งผสมผสานระบบตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic) กับสมการชลศาสตร์ เพื่อปรับค่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลให้สอดคล้องกับสภาวะจริง และใช้คำนวณระยะเปิดบานประตูระบายน้ำ ระบบถูกพัฒนาด้วยภาษา Python โดยใช้ไลบรารี Scikit-Fuzzy และสามารถพัฒนาไปสู่แนวคิด Digital Twin สำหรับการควบคุมอาคารชลประทานจากระยะไกลในอนาคต

3.วิธีการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษา พื้นที่ศึกษาคือ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบรมธาตุ จังหวัดชัยนาท ซึ่งเป็นระบบชลประทานขนาดกลาง มีอาคารระบายน้ำหลัก 5 แห่ง ได้แก่ ปตร.บรมธาตุ ปตร.ปากคลอง 1 ซ้าย ปตร.ปากคลอง 2 ซ้าย ปตร.ปากคลอง 1 ขวา และ ปตร.ถ้ำเข้ โดยอาคารเหล่านี้ทำหน้าที่ควบคุมการกระจายน้ำเข้าสู่ระบบคลองส่งน้ำหลักของโครงการ

3.2 วรรณกรรมทบทวน

3.2.1 ทฤษฎี Fuzzy Logic

ระบบตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic) ถูกเสนอโดย Zadeh (1965) ซึ่งอนุญาตให้ค่าตัวแปรมีค่าอยู่ในช่วง 0–1 แทนการกำหนดค่าแบบจริงหรือเท็จใน Boolean Logic ทำให้สามารถจัดการกับความไม่แน่นอนของข้อมูลได้ดี โดย Ross (2010) ได้อธิบายการประยุกต์ใช้ Fuzzy Logic ในงานวิศวกรรมควบคุมและระบบตัดสินใจ ซึ่งเหมาะสมกับระบบชลประทานที่มีความแปรปรวนของสภาพการไหล

3.2.2 ทฤษฎีชลศาสตร์

Chow (1959) อธิบายหลักการไหลในลำน้ำเปิดและสมการชลศาสตร์สำหรับการไหลผ่านช่องเปิด ซึ่งเป็นพื้นฐานของการคำนวณอัตราการไหลผ่านประตูระบายน้ำ

United States Bureau of Reclamation (USBR) ระบุว่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลในกรณีการไหลแบบท่วมท้ายน้ำ (Submerged Flow) มีความผันแปรสูงและไม่สามารถใช้ค่าคงที่เพียงค่าเดียวได้ โดยสมการพื้นฐานที่ใช้คำนวณปริมาณน้ำผ่านประตูระบายน้ำ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$Q = C_s L G_o \sqrt{2gh} \qquad (1)$$

โดยที่

Cs = สัมประสิทธิ์การไหลแบบท่วมท้ายน้ำ, Go = ระยะเปิดบานประตู, L = ความกว้างช่องบาน

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, h = ผลต่างของระดับพลังงานน้ำระหว่างเหนือน้ำและท้ายน้ำ

กรมชลประทาน (2560) จัดทำคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Manual) การสอบเทียบ (Calibration) อาคารควบคุมน้ำ เพื่อหาปริมาณน้ำผ่านอาคารแต่ละอาคาร กล่าวคือ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำระดับน้ำเหนือ-ท้ายอาคาร ขนาดของการเปิดบานประตูระบายน้ำและสัมประสิทธิ์การไหลผ่านอาคาร

นอกจากนี้ วราวุธ (2537) อธิบายว่า การไหลในระบบคลองส่งน้ำส่วนใหญ่เป็นแบบท่วมท้ายบาน (Submerged Flow) เนื่องจากคลองมีความลาดเทน้อย ทำให้การควบคุมอาคารท้ายน้ำมีผลกระทบต่อระดับน้ำของอาคารเหนือน้ำ

3.3 Digital Twin

แนวคิด Digital Twin ถูกเสนอโดย Grieves (2014) ซึ่งหมายถึงการสร้างแบบจำลองเสมือนของระบบจริงเพื่อใช้ในการจำลอง วิเคราะห์ และควบคุมระบบจริงผ่านข้อมูลแบบ Real-time เทคโนโลยีนี้ถูกนำมาใช้ในงานบริหารจัดการน้ำและระบบ IoT มากขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเช่นการประยุกต์ใช้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การประยุกต์ใช้ Digital Twin ในงานบริหารจัดการน้ำ

ด้านการใช้งาน	การประยุกต์ใช้	คำอธิบายเชิงวิศวกรรม
การควบคุมอาคารชลประทาน	คำนวณระยะเปิดบานอัตโนมัติ	ใช้ข้อมูลระดับน้ำและอัตราการไหลแบบ Real-time เพื่อคำนวณ Gate Opening ตามสมการชลศาสตร์
การจำลองระบบส่งน้ำ	จำลองการไหลในคลอง	ใช้แบบจำลอง Hydraulic Model เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการเปิด–ปิดอาคาร
การพยากรณ์ระดับน้ำ	คาดการณ์ล่วงหน้า	ใช้ข้อมูลย้อนหลังร่วมกับแบบจำลองเพื่อคาดการณ์ระดับน้ำ
การติดตามสถานะระบบ	Monitoring Real-time	รับข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อแสดงสถานะของระบบชลประทาน
การตรวจสอบความผิดปกติ	Anomaly Detection	เปรียบเทียบค่าคำนวณกับค่าที่วัดจริงเพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อน
การสนับสนุนการตัดสินใจ	Decision Support System	ใช้ผลการจำลองช่วยผู้ควบคุมเลือกการเปิดบานที่เหมาะสม
การควบคุมระยะไกล	Remote Control	ส่งคำสั่งควบคุมอาคารผ่านเครือข่ายสื่อสาร

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า Digital Twin ถูกนำมาใช้ในการบริหารจัดการอาคารชลประทานในหลายประเทศ โดยมีแนวทางการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน ได้แก่

1.) การจัดการความเสี่ยงระดับมหภาค โครงการ Maeslantkering ประเทศเนเธอร์แลนด์ ใช้ Digital Twin ในรูปแบบ Decision Support System เพื่อควบคุมประตูกั้นน้ำขนาดใหญ่ โดยประมวลผลข้อมูล Real-time จากเซนเซอร์ร่วมกับแบบจำลองสภาพอากาศเพื่อคาดการณ์ Storm Surge และสั่งปิดประตูอัตโนมัติ (Rijkswaterstaat, 2022)

2.) แบบจำลองสามมิติเชิงทัศนภาพ โครงการ Saman Dam ประเทศเกาหลีใต้ ใช้ Digital Twin จำลองการไหลผ่าน Spillway Gates แบบสามมิติ เพื่อประเมินผลกระทบการระบายน้ำต่อพื้นที่ท้ายน้ำก่อนการระบายจริง (K-water, 2023)

3.) การควบคุมโครงข่ายคลองอัตโนมัติระบบ Total Channel Control (TCC) ของ Rubicon Water ประเทศออสเตรเลีย ใช้ Fuzzy Logic และ AI ในการควบคุมประตูส่งน้ำนับร้อยบาน โดยคำนวณเวลาเดินทางของน้ำ (Travel Time) เพื่อลดการสูญเสียน้ำในระบบ (Rubicon Water, 2021)

4.) การจัดการน้ำในเมืองอัจฉริยะ โครงการ Wuhan Smart Water ประเทศจีน ใช้ Digital Twin เชื่อมโยงประตูระบายน้ำกับระบบระบายน้ำในเมือง เพื่อพร่องน้ำล่วงหน้าตามการพยากรณ์ฝนและลดความเสี่ยงน้ำท่วมในเขตเมือง (Wuhan Bureau, 2024)

5.) การเชื่อมโยงสู่กรณีศึกษาโครงการบรมธาตุ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีระดับสากล ระบบ Fuzzy Hybrid Model ของโครงการบรมธาตุมีลักษณะใกล้เคียงกับแนวทางของออสเตรเลีย โดยมุ่งเน้นการเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Cs) และใช้เป็นกลไกเชิงปัญญา (Intelligence Engine) สำหรับพัฒนา Digital Twin เพื่อสนับสนุนการพยากรณ์และการตัดสินใจในการบริหารจัดการน้ำ

3.2.3 Python และ Scikit-Fuzzy

Python เป็นภาษาโปรแกรมระดับสูงที่พัฒนาโดย Guido van Rossum และเผยแพร่ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยมีจุดเด่นด้านโครงสร้างที่อ่านง่าย รองรับงานคำนวณทางวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม ปัญญาประดิษฐ์ และการวิเคราะห์ข้อมูล ทำให้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านวิศวกรรมและระบบควบคุมสมัยใหม่
งานวิจัยนี้เลือกใช้ Python ในการพัฒนาระบบคำนวณระยะเปิดบานแบบ Fuzzy Hybrid เนื่องจากสามารถรองรับการคำนวณทางชลศาสตร์ เช่น $\sqrt{2gH}$การคำนวณเชิงเมทริกซ์ และการปรับเทียบข้อมูลเชิงสถิติ รวมทั้งมีไลบรารีทางวิทยาศาสตร์ที่สำคัญ เช่น NumPy และ Pandas ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลข้อมูล นอกจากนี้ Python ยังมีไลบรารีสำหรับพัฒนาระบบตรรกะคลุมเครือโดยตรงคือ Scikit-Fuzzy ซึ่งใช้ในการปรับค่าค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Cs) ในงานวิจัยนี้ (Zadeh, 1965; Ross, 2010)

Scikit-Fuzzy เป็นไลบรารีภาษา Python สำหรับพัฒนาระบบ Fuzzy Inference System (Scikit-Fuzzy Development Team, 2019) โดยรองรับกระบวนการหลักของระบบ Fuzzy ได้แก่

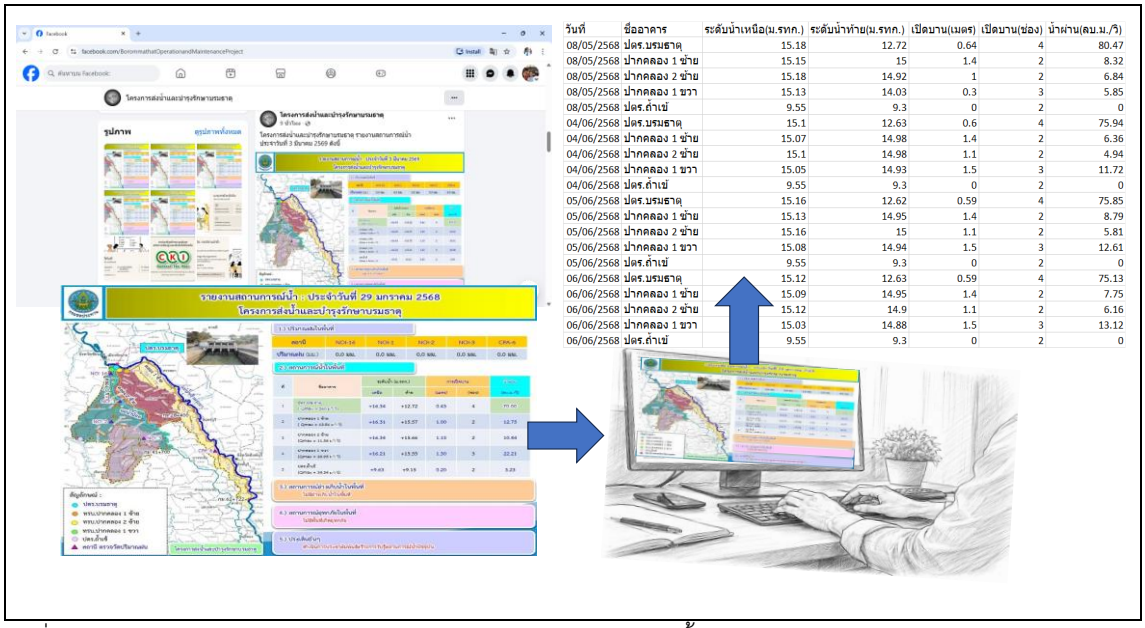
1.) Fuzzification การแปลงค่าจริง (Crisp Value) เป็นค่าความเป็นสมาชิก (Membership Value)
2.) Membership Function การกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปร โดยรองรับรูปแบบต่าง ๆ เช่น Triangular, Trapezoidal และ Gaussian ในงานวิจัยนี้ใช้ Triangular Membership Function
3.) Inference Engine การประมวลผลกฎ (Rule Base) ซึ่งใช้วิธี Mamdani Inference Method ที่เป็นมาตรฐานในงานวิศวกรรม
4.) Defuzzification การแปลงค่าจาก Fuzzy กลับเป็นค่าจริง โดยใช้วิธี Centroid Method ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีความต่อเนื่องและเหมาะกับการควบคุมระบบชลศาสตร์

ในงานวิจัยนี้กำหนด 9 กฎ (Rules) เพื่อครอบคลุมสภาวะการไหลหลักของระบบ และใช้ Fuzzy Logic ในการปรับค่า Cs ให้เหมาะสมกับสภาพการไหลจริง

นอกจากนี้ Python ยังสามารถเชื่อมต่อกับ IoT, Database, Web API และ Cloud ได้ ทำให้สามารถพัฒนาไปสู่ระบบ Digital Twin ในอนาคตได้ง่าย ในส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) ของโปรแกรมพัฒนาด้วย Tkinter ซึ่งสามารถใช้งานบนคอมพิวเตอร์สำนักงานได้โดยไม่ต้องติดตั้งซอฟต์แวร์เพิ่มเติม และรองรับการทำงานแบบ offline

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 การรวบรวมข้อมูล ข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองได้จากรายงานสถานการณ์น้ำของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบรมธาตุ จังหวัดชัยนาท ซึ่งเผยแพร่ผ่าน Facebook ของโครงการในช่วงปี พ.ศ. 2567–2568 โดยให้คนใช้วิธีอ่านค่าจากภาพรายงานและพิมพ์บันทึกข้อมูลลงในไฟล์ datalogger2567_69.csv (รูปที่ 1)



วันที่	ชื่ออาคาร	ระดับน้ำเหนือ(ม.รทก.)	ระดับน้ำท้าย(ม.รทก.)	เปิดบาน(เมตร)	เปิดบาน(ช่อง)	น้ำผ่าน(ลบ.ม./วิ)
08/05/2568	ปตร.บรมธาตุ	15.18	12.72	0.64	4	80.47
08/05/2568	ปากคลอง 1 ซ้าย	15.15	15	1.4	2	8.32
08/05/2568	ปากคลอง 2 ซ้าย	15.18	14.92	1	2	6.84
08/05/2568	ปากคลอง 1 ขวา	15.13	14.03	0.3	3	5.85
08/05/2568	ปตร.ถ้ำเข่	9.55	9.3	0	2	0
04/06/2568	ปตร.บรมธาตุ	15.1	12.63	0.6	4	75.94
04/06/2568	ปากคลอง 1 ซ้าย	15.07	14.98	1.4	2	6.36
04/06/2568	ปากคลอง 2 ซ้าย	15.1	14.98	1.1	2	4.94
04/06/2568	ปากคลอง 1 ขวา	15.05	14.93	1.5	3	11.72
04/06/2568	ปตร.ถ้ำเข่	9.55	9.3	0	2	0
05/06/2568	ปตร.บรมธาตุ	15.16	12.62	0.59	4	75.85
05/06/2568	ปากคลอง 1 ซ้าย	15.13	14.95	1.4	2	8.79
05/06/2568	ปากคลอง 2 ซ้าย	15.16	15	1.1	2	5.81
05/06/2568	ปากคลอง 1 ขวา	15.08	14.94	1.5	3	12.61
05/06/2568	ปตร.ถ้ำเข่	9.55	9.3	0	2	0
06/06/2568	ปตร.บรมธาตุ	15.12	12.63	0.59	4	75.13
06/06/2568	ปากคลอง 1 ซ้าย	15.09	14.95	1.4	2	7.75
06/06/2568	ปากคลอง 2 ซ้าย	15.12	14.9	1.1	2	6.16
06/06/2568	ปากคลอง 1 ขวา	15.03	14.88	1.5	3	13.12
06/06/2568	ปตร.ถ้ำเข่	9.55	9.3	0	2	0

รูปที่ 1 ใช้คนอ่านค่าจากภาพรายงานผ่าน Facebook ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบรมธาตุฯ และพิมพ์บันทึกข้อมูลลงในไฟล์ datalogger2567_69.csv

ภายในชุดข้อมูลประกอบด้วย

1.) ระดับน้ำเหนือน้ำ
2.) ระดับน้ำท้ายน้ำ
3.) อัตราการไหล
4.) ระยะเปิดบานจริง

รวมจำนวน 547 ชุดข้อมูล ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง โดยครอบคลุมช่วงสภาพการทำงานที่หลากหลายของอาคารชลประทาน

3.3.2 การพัฒนาแบบจำลอง Fuzzy Hybrid

แบบจำลอง Fuzzy Hybrid สำหรับคำนวณระยะเปิดบานประตูระบายน้ำ (Go) เป็นการผสมผสานระหว่าง Fuzzy Logic และ สมการชลศาสตร์ (Hydraulic Equation) เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลคงที่ในสูตรชลศาสตร์แบบดั้งเดิม แนวคิด Hybrid Model ประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่

1.) Fuzzy Logic Part ทำหน้าที่ประเมินค่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลแบบท่วมท้ายบาน (Cs: Coefficient of Submerged Flow) ให้เหมาะสมกับสภาพการไหลจริง โดยใช้ข้อมูลระดับน้ำและอัตราการไหลเป็นตัวแปรนำเข้า

2.) Hydraulic Part นำค่า Cs ที่ได้จาก Fuzzy Logic ไปคำนวณ ระยะเปิดบานแนะนำ (Go) ด้วยสมการการไหลผ่านช่องระบายแบบ Submerged Orifice Flow ในการสอบเทียบแบบจำลอง มีการใช้ข้อมูลย้อนหลังจากไฟล์ datalogger.csv เพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ของอาคาร เช่น ความกว้างประสิทธิผลของช่องระบาย (L) ซึ่งได้จากการคำนวณย้อนกลับ (Inverse Calculation) จากข้อมูลหน้างานจริง แนวทางนี้ช่วยให้การคำนวณมีความปลอดภัยเชิงปฏิบัติการ โดยให้ค่าการเปิดบานที่มากกว่าคำนวณจริงเล็กน้อยในลักษณะระมัดระวัง และลดความเสี่ยงของการระบายน้ำเกินความต้องการ

3.3.3 โครงสร้างระบบ Fuzzy ด้วย Python

ระบบ Fuzzy Hybrid ถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมภาษา Python ชื่อ Fuzzy Hybrid Dtwin RUN 20260227.py โดยใช้ฟังก์ชัน setup_cs_fuzzy() เพื่อสร้างระบบ Fuzzy Inference System สำหรับประเมินค่า Cs (รูปที่ 2)

3.3.4 ตัวแปรนำเข้า (Input Variables)

1.) ความต่างระดับน้ำ (h_diff) ช่วงค่า 0–10 เมตร แบ่งเป็น 3 ระดับ Low, Mid, High

2.) อัตราการไหลที่ต้องการ (Q) ช่วงค่า 0–500 ลูกบาศก์เมตร/วินาที แบ่งเป็น Low, Mid, High

h_diff = ctrl.Antecedent(np.arange(0,11,0.1),'h_diff')q_in = ctrl.Antecedent(np.arange(0,501,1),'q_in')

3.3.5 ตัวแปรผลลัพธ์ (Output Variable)

ค่าสัมประสิทธิ์การไหลแบบท่วมท้ายบาน (Cs) กำหนดช่วงค่า 0.05–0.60

cs = ctrl.Consequent (np.arange (0.05,0.6,0.01),'cs')

ใช้ Triangular Membership Function แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 Triangular Membership Function

ระดับ	ช่วงค่า
Low	[0.05, 0.12, 0.22]
Mid	[0.18, 0.26, 0.35]
High	[0.30, 0.40, 0.60]

3.3.6 กฎ Fuzzy (Rule Base)

กฎ Fuzzy ถูกกำหนดเป็นเมตริกซ์ 3 × 3 (ตารางที่ 3) โดยใช้ตัวแปร h_diff และ Q เป็น Input และให้ผลลัพธ์เป็น Cs รวมทั้งหมด 9 กฎ ครอบคลุมสภาวะการไหลหลักของอาคารชลประทาน

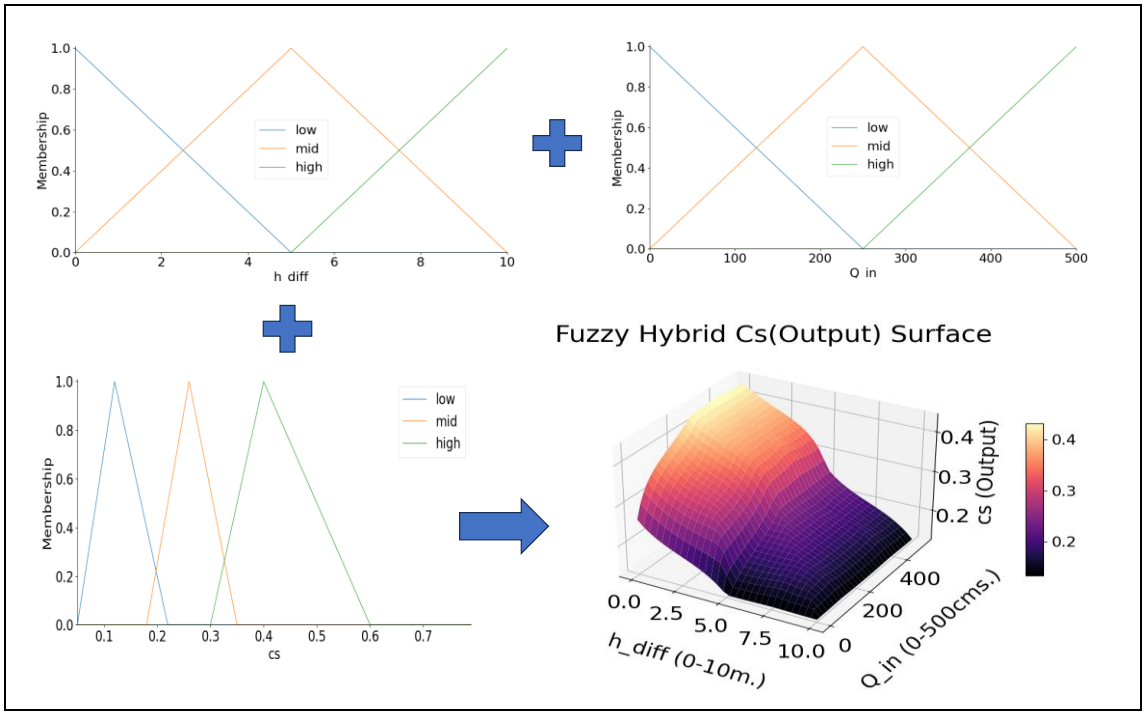
ตารางที่ 3 กฎ Fuzzy ถูกกำหนดเป็นเมตริกซ์ 3 × 3 รวม 9 กฎ

h_diff \ Q	Low	Mid	High
Low	Mid	High	High
Mid	Low	Mid	Mid
High	Low	Low	Low

ตัวอย่าง Python Code

```
rules = [
ctrl.Rule(h_diff['low'] & q_in['low'], cs['mid']),
ctrl.Rule(h_diff['low'] & q_in['mid'], cs['high']),
ctrl.Rule(h_diff['low'] & q_in['high'], cs['high']),
ctrl.Rule(h_diff['mid'] & q_in['low'], cs['low']),
ctrl.Rule(h_diff['mid'] & q_in['mid'], cs['mid']),
ctrl.Rule(h_diff['mid'] & q_in['high'], cs['mid']),
ctrl.Rule(h_diff['high'] & q_in['low'], cs['low']),
ctrl.Rule(h_diff['high'] & q_in['mid'], cs['low']),
ctrl.Rule(h_diff['high'] & q_in['high'], cs['low'])
]
```

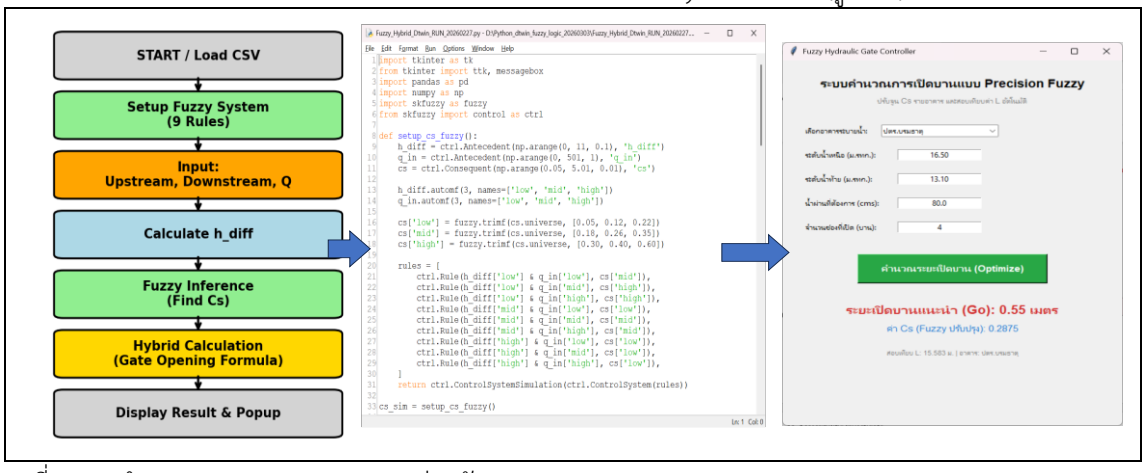
แนวคิดของกฎคือเมื่อ ความต่างระดับน้ำต่ำ ระบบจะเพิ่มค่า Cs เพื่อเพิ่มการระบายน้ำและเมื่อความต่างระดับน้ำสูง ระบบจะลดค่า Cs เพื่อสะท้อนการสูญเสียพลังงานของการไหล



รูปที่ 2 โครงสร้างระบบ Fuzzy ด้วย Python ให้ผลลัพธ์เป็น Cs

3.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

ขั้นตอนการทำงานของระบบแสดงใน Flow Chart ร่วมกับ Python Code (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 การทำงานของระบบ Flow Chart ร่วมกับ Python Code และ Graphic User Interface (GUI)

กระบวนการหลักของโปรแกรมประกอบด้วย

3.4.1 โหลดข้อมูลจริงจาก CSV ใช้สำหรับการสอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง

3.4.2 สร้างระบบ Fuzzy (9 Rules) เพื่อประเมินค่า Cs ตามสภาวะการไหล

3.4.3 รับข้อมูลจากผู้ใช้งานผ่าน GUI ได้แก่ การเลือกอาคาร (ได้แก่ ปตร.บรมธาตุ ปตร.ปากคลอง 1 ซ้าย ปตร.ปากคลอง 2 ซ้าย ปตร.ปากคลอง 1 ขวา และ ปตร.ถ้ำเข้) ระดับน้ำเหนือน้ำ ระดับน้ำท้ายน้ำ อัตราการไหล และจำนวนช่องระบาย

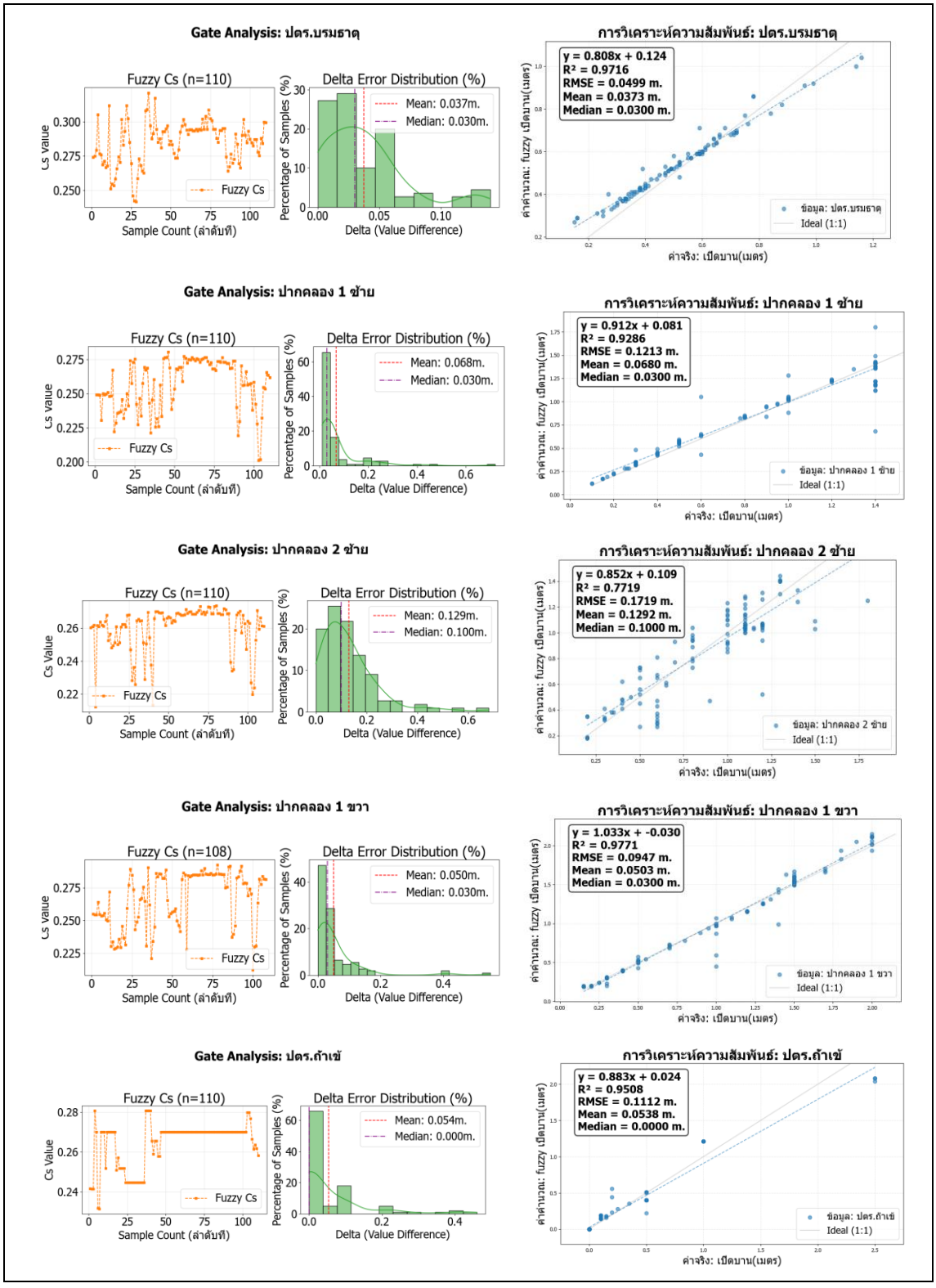
3.4.4 คำนวณความต่างระดับน้ำ (h_diff) และ Fuzzy Inference เพื่อคำนวณค่า Cs ที่เหมาะสม

3.4.5 Hybrid Hydraulic Calculation คำนวณระยะเปิดบาน

3.4.6 แสดงผลลัพธ์บนหน้าจอ ผ่านทาง Graphic User Interface (GUI) โดยคำนวณระยะเปิดบานที่เหมาะสม (แนะนำ) และแสดงผลเป็นค่า Gate Opening (เมตร) บนหน้าจอ

4 ผลการศึกษา

4.1 การสอบเทียบค่าความแม่นยำของแบบจำลอง เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง ได้พัฒนาโปรแกรมทดสอบชื่อ Fuzzy Hybrid Test 20260227.py ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกันกับโปรแกรมหลักคือ Fuzzy Hybrid Dtwin RUN 20260227.py แต่ถูกออกแบบให้สามารถนำเข้าข้อมูลจากไฟล์ datalogger2567 69.csv โดยอัตโนมัติ และบันทึกผลลัพธ์การทดสอบเป็นไฟล์ fuzzy test result.csv การทดสอบใช้ข้อมูลภาคสนามรวม 547 ชุดข้อมูล จากอาคารชลประทานหลัก 5 แห่ง ในโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบรมธาตุ จังหวัดชัยนาท โดยประเมินความแม่นยำของแบบจำลองด้วยตัวชี้วัดทางสถิติ ได้แก่ RMSE, Mean Delta, Median Delta และค่าสัมประสิทธิ์ R^2 ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4 และสรุปผลการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 4 การประเมินความแม่นยำของแบบจำลองด้วยตัวชี้วัดทางสถิติ

ตารางที่ 4 สรุปผลการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

อาคาร	จำนวนข้อมูล	Mean (m.)	Median (m.)	R^2	RMSE (m.)
ปตร.บรมธาตุ	110	0.0373	0.03	0.9716	0.0218
ปากคลอง 1 ซ้าย	110	0.068	0.03	0.9286	0.0227
ปากคลอง 2 ซ้าย	110	0.1292	0.1	0.7719	0.0137
ปากคลอง 1 ขวา	107	0.0467	0.03	0.9816	0.0215
ปตร.ถ้ำเข้	110	0.0538	0	0.9508	0.0126

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Fuzzy Hybrid สามารถคำนวณระยะเปิดบานได้ใกล้เคียงค่าจริง โดยค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0126–0.0227 เมตร (ประมาณ 1–2 เซนติเมตร) ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำมากเมื่อเทียบกับช่วงการเปิดบานจริงที่มักอยู่ระหว่าง 0.20–1.00 เมตร ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.7719–0.9816 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรผันของข้อมูลภาคสนามได้ดีถึงดีมาก

ในเชิงวิศวกรรม อาคาร ปากคลอง 1 ขวา มีค่า R^2 สูงที่สุด (0.9816) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่คำนวณได้กับค่าจริงในระดับดีเยี่ยม ขณะที่อาคาร ปตร.ถ้ำเข้ มีค่า RMSE ต่ำที่สุด (0.0126 m.) แสดงถึงความแม่นยำสูงมากของแบบจำลองในสภาพการไหลที่ค่อนข้างเสถียร

ในส่วนอาคาร ปากคลอง 2 ซ้าย มีข้อมูลทดสอบ 110 ชุด ค่า RMSE = 0.0137 m. แสดงว่าแบบจำลองสามารถคำนวณระยะเปิดบานได้ใกล้เคียงค่าจริงมาก (ประมาณ 1 ซม.) อย่างไรก็ตามค่า R^2 = 0.7719 ต่ำกว่าอาคารอื่น แสดงว่าข้อมูลมีความแปรผันสูง ในเชิงชลศาสตร์ สาเหตุอาจเกิดจากการไหลที่เปลี่ยนแปลงระหว่าง Free Flow และ Submerged Flow รวมถึงผลกระทบจากระดับน้ำท้ายน้ำและการควบคุมอาคารในระบบคลอง ทำให้ค่า Cs เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง แม้เช่นนั้น ค่า RMSE ที่ต่ำมากแสดงว่าแบบจำลอง Fuzzy Hybrid ยังสามารถคำนวณระยะเปิดบานได้แม่นยำในเชิงปฏิบัติการ และสามารถรองรับสภาพการไหลที่มีความไม่แน่นอนได้ดี.

โดยรวมแล้วแบบจำลองสามารถรองรับความผันแปรของสภาพการไหลในระบบคลองส่งน้ำ ซึ่งมักอยู่ในรูป Submerged Flow และ Unsteady Flow ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากระบบ Fuzzy Logic สามารถปรับค่าค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Cs) ให้สอดคล้องกับสภาพการไหลจริง

4.2 การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมของแบบจำลอง

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Fuzzy Hybrid สามารถจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง ระดับน้ำเหนือน้ำ ระดับน้ำท้ายน้ำ อัตราการไหล และระยะเปิดบาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าสัมประสิทธิ์การไหล Cs เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อความแม่นยำของการคำนวณ

นอกจากนี้แบบจำลองยังสามารถรองรับ Hydraulic Uncertainty ที่เกิดจากปัจจัยภาคสนาม เช่น การสะสมตะกอน ความขรุขระของคลอง และความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดระดับน้ำ ซึ่งอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ ±0.01 เมตร

4.3 ศักยภาพในการพัฒนา Digital Twin จากผลการทดสอบพบว่าแบบจำลอง Fuzzy Hybrid มีความแม่นยำและเสถียรภาพเพียงพอสำหรับการนำไปใช้เป็น แกนหลักของระบบ Digital Twin สำหรับอาคารชลประทาน ระบบดังกล่าวสามารถใช้ข้อมูล ระดับน้ำและอัตราการไหลแบบ Real-time เพื่อ

4.3.1 คำนวณค่า Cs ตามสภาพการไหลจริง

4.3.2 คำนวณระยะเปิดบานที่เหมาะสม

4.3.3 ตรวจสอบความผิดปกติของระบบ เช่น การอุดตันของช่องระบาย หรือความคลาดเคลื่อนหรือความผิดปกติของเครื่องมือวัด

4.3.4 สนับสนุนการตัดสินใจในการควบคุมอาคารชลประทาน

โดยรวมแล้วแบบจำลองสามารถคำนวณระยะเปิดบานได้ด้วย ความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 0.03 เมตร และมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมอาคารชลประทานแบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ

5.การอภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การทดสอบแบบจำลอง Fuzzy Hybrid สำหรับอาคารชลประทานหลัก 5 แห่งในเขตโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบรมธาตุ จังหวัดชัยนาท โดยใช้ข้อมูลภาคสนาม 547 ชุด พบว่าแบบจำลองสามารถคำนวณระยะเปิดบานได้ใกล้เคียงกับค่าที่ใช้งานจริงในทุกอาคาร โดยมีค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0126–0.0227 เมตร (ประมาณ 1–2 เซนติเมตร) ซึ่งถือว่าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนต่ำมากเมื่อเทียบกับช่วงระยะเปิดบานจริงประมาณ 0.20–1.00 เมตร หรือคิดเป็นประมาณ 1–5% ของระยะเปิดบานจริง

ค่าความแตกต่างเฉลี่ย (Mean Delta) อยู่ในช่วง 0.037–0.129 เมตร และค่ามัธยฐานของความคลาดเคลื่อน (Median Delta) อยู่ในช่วง 0.000–0.100 เมตร แสดงว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนต่ำ โดยเฉพาะอาคาร ปตร.ถ้ำเข้ ที่มีค่า Median Delta เท่ากับ 0.000 เมตร แสดงว่าในหลายกรณีแบบจำลองสามารถคำนวณระยะเปิดบานได้ตรงกับค่าที่ใช้งานจริง

ค่า Coefficient of Determination (R^2) อยู่ในช่วง 0.7719–0.9816 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ อัตราการไหล และระยะเปิดบานได้ในระดับดีถึงดีมาก โดยอาคาร ปากคลอง 1 ขวา มีค่า R^2 = 0.9816 ขณะที่อาคาร ปากคลอง 2 ซ้าย มีค่า R^2 = 0.7719 ซึ่งสะท้อนถึงความแปรผันของข้อมูลสนามที่สูงกว่าอาคารอื่น แม้เช่นนั้นค่า RMSE ที่ต่ำ ยังคงแสดงว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในเชิงปฏิบัติการ

ในเชิงวิศวกรรมชลศาสตร์ แบบจำลองสามารถปรับค่า ค่าสัมประสิทธิ์การไหลแบบจม (Cs) ได้สอดคล้องกับสภาพการไหลจริง โดยค่า Cs จากแบบจำลองอยู่ในช่วงประมาณ 0.10–0.40 ซึ่งครอบคลุมสภาวะ Submerged Flow และสะท้อนผลกระทบของระดับน้ำเหนือน้ำ ระดับน้ำท้ายน้ำ และอัตราการไหลได้อย่างเหมาะสม

แม้ว่าระบบชลประทานจริงจะมีความไม่แน่นอนจากหลายปัจจัย เช่น ความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดระดับน้ำประมาณ ±0.01 เมตร ความสูญเสียพลังงานในคลอง และการสะสมตะกอน แต่ค่า RMSE ที่ต่ำกว่า 0.03 เมตร ในทุกอาคารแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีเสถียรภาพสูงและสามารถรองรับความไม่แน่นอนของระบบได้ดี นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนระดับ 1–2 เซนติเมตร ยังต่ำกว่าความละเอียดของการปรับบานระบายจริงซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 1–5 เซนติเมตร จึงสามารถนำไปใช้ในงานควบคุมอาคารระบายน้ำได้จริง

โดยสรุป แบบจำลอง Fuzzy Hybrid สามารถจำลองพฤติกรรมการไหลผ่านอาคารชลประทานได้อย่างแม่นยำ มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำและมีความสอดคล้องกับข้อมูลสนามในระดับสูง แบบจำลองมีศักยภาพในการใช้เป็นเครื่องมือช่วยตัดสินใจในการกำหนดระยะเปิดบาน และสามารถพัฒนาเป็นแกนหลักของระบบ Digital Twin สำหรับการควบคุมอาคารชลประทานแบบ Real-time ในอนาคต รองรับการพัฒนา Smart Irrigation, Automatic Gate และการควบคุมจากระยะไกล ได้อย่างมีประสิทธิภาพ.

6. บรรณานุกรม

กรมชลประทาน. (2560). คู่มือการปฏิบัติงาน (Work Manual) การสอบเทียบอาคารชลประทาน. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์กรมชลประทาน.

วราวุธ วุฒิวณิชย์. (2537). การคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทาน Calculation of Flow Through Irrigation Structures. เอกสารประกอบการบรรยาย หลักสูตรการจัดการน้ำเพื่อการชลประทาน สำหรับข้าราชการลาว, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม.

Chow, V. T. (1959). Open Channel Hydraulics. New York : McGraw-Hill.

Grieves, M. (2014). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. [Online]. Available : https://www.researchgate.net/publication/275211041. 2024, March 11.

Korea Water Resources Corporation. (2023). Digital Twin-based Smart Dam Management System. [Online]. Available : https://www.kwater.or.kr. 2024, March 11.

Rijkswaterstaat. (2022). The Maeslantkering: Storm Surge Barrier Maintenance and Operation. [Online]. Available : https://www.rijkswaterstaat.nl. 2024, March 11.

Ross, T. J. (2010). Fuzzy Logic with Engineering Applications. Chichester : Wiley.

Rubicon Water. (2021). Automated Canal Control and Digital Twin Integration in Irrigation. [Online]. Available : https://www.rubiconwater.com. 2024, March 11.

Scikit-Fuzzy Development Team. (2019). Scikit-Fuzzy Documentation. [Online]. Available : https://pythonhosted.org/scikit-fuzzy/. 2024, March 11.

Smart Water Wuhan Bureau. (2024). Implementing Digital Twin for Urban Flood Control. [Online]. Available : http://swj.wuhan.gov.cn. 2024, March 11.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. Information and Control, 8(3), 338–353.