



การใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์สำหรับโครงข่าย ท่อน้ำประปา: จังหวัดสมุทรปราการ ประเทศไทย

Using an Optimization Approach to Calibrate Hydraulic Models for Water Distribution Networks: Samut Prakan, Thailand

ณัฏพล จารุวิมลกุล¹ จิระเมธ ช้างคล่อม^{1*} อติชัย พรพรหมินทร์¹ และสุรชัย ลิปิวัฒนาการ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10100

Natchapol Charuwimolkul¹, Jiramate Changklom^{1*}, Adichai Pornprommin¹ and
Surachai Lipiwattanakarn¹

¹Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand
50 Ngamwongwan Road, Lat yao, Chatuchak, Bangkok, 10900

*ผู้รับผิดชอบบทความ: jiramate.ch@ku.th เบอร์โทรศัพท์ 064-814-0542

Received: 14 March 2022, Revised: 7 June 2022, Accepted: 8 July 2022

บทคัดย่อ

แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปาเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจสำหรับการบริหารจัดการ ซึ่งการใช้แบบจำลองที่เป็นตัวแทนของโครงข่ายท่อน้ำประปาจริงได้ต้องทำการสอบเทียบ งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอกระบวนการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์โดยลดค่าผลรวมผลต่างกำลังสองของอัตราการไหลจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด และ แรงดันจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด โดยอาศัยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามวิธีการ Brent's Method ซึ่งมีกระบวนการดังนี้ 1) หาค่าสัมประสิทธิ์จำลองการรั่วที่เหมาะสมที่สุด 2) ปรับค่ารูปแบบการใช้น้ำโดยอ้างอิงกับข้อมูลการใช้น้ำ 3) ปรับแก้ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดัน และ 4) ปรับค่าความขรุขระของผนังท่อเริ่มจากอายุเส้นท่อ งานวิจัยนี้ได้ทดลองกับ 24 พื้นที่เฝ้าระวังของการประปานครหลวงสาขาสมุทรปราการโดยยกมา 1 พื้นที่เพื่ออภิปรายผล ซึ่งได้ผลรวมผลต่างกำลังสองอัตราการไหลและแรงดันเท่ากับ 4 (ลบ.ม./ชม.)² และ 0.44 (ม.)² ตามลำดับ

คำสำคัญ : การสอบเทียบแบบจำลอง โครงข่ายท่อน้ำประปา พื้นที่เฝ้าระวัง กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

Abstract

The model for water distribution networks (WDNs) is an important tool to support network operations. The model requires an accurate calibration to represent an actual network. The calibration process is to minimize the sum square error (SSE) between the simulated values and the measurements on both flow and pressure. This research proposes a calibration method using the Brent's optimization. The procedure includes: 1) finding an optimal emitter coefficient to represent leaks, 2) adjusting the demand patterns from the consumption data, 3) adjusting the elevation of pressure measurement, and 4) adjusting the roughness of pipe walls starting from pipe age data. The proposed method is demonstrated on 24 District Metered Areas in Samut Prakan's WDNs, Thailand. The discussed area has SSE of flow and pressure equal to 4 (m³/Hr.)² and 0.44 (m)², respectively.

Keywords: Model Calibration, Water Distribution Network, District Metered Areas, Optimization



1. บทนำ

โครงข่ายท่อน้ำประปาเป็นระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานขนาดใหญ่โดยการบริหารจัดการระบบนั้นมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง และส่งผลกระทบต่อผู้ใช้น้ำ ดังนั้นจึงต้องการกลยุทธ์ในการบริหารจัดการที่ชัดเจนและมีประสิทธิภาพอย่างยิ่งยวดเพื่อลดโอกาสการเกิดความเสียหายอันเกิดจากกลยุทธ์ที่ไม่เหมาะสม ซึ่งตัวช่วยในการตัดสินใจที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพคือการใช้แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา [1] โดยมีผู้พัฒนาจำนวนมากได้จัดทำซอฟต์แวร์สำหรับการขึ้นแบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือสร้างแบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด เพื่อที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบจริงและสามารถทดลองกลยุทธ์ต่าง ๆ บนแบบจำลองก่อนตัดสินใจเลือกกลยุทธ์ที่เหมาะสมเพื่อไปดำเนินการบนระบบจริง

การสร้างแบบจำลองที่สามารถเป็นตัวแทนของระบบจริงได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์ก่อน โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสมที่สุด หากแต่ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จะมีความต่างออกไปตามรูปแบบของข้อมูลในระบบนั้นได้ทำการบันทึกไว้ ซึ่งกล่าวได้ว่าการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์ของโครงข่ายท่อน้ำประปา กระบวนการใดกระบวนการหนึ่งนั้นไม่สามารถใช้ได้กับทุกระบบที่มีอยู่จริง

ปัจจุบัน หลายหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในประเทศไทย เลือกใช้กระบวนการสอบเทียบแบบจำลองโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ไปทีละตัวด้วยบุคคล เนื่องจากข้อมูลที่มีอยู่ปัจจุบันมีความไม่สมบูรณ์ค่อนข้างสูงจึงเป็นได้ยากที่จะใช้กระบวนการสอบเทียบแบบจำลองโดยอัตโนมัติ ซึ่งข้อเสียของกระบวนการนี้คือใช้ระยะเวลาในการสอบเทียบอย่างมากและมีความแม่นยำค่อนข้างต่ำ เป็นที่มาให้นักวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับกระบวนการสอบเทียบแบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปาโดยอัตโนมัติสำหรับระบบที่มีความไม่สมบูรณ์ของข้อมูลค่อนข้างสูงโดยอาศัยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามวิธีของ Brent's Method โดยงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองใช้กับระบบที่มีอยู่จริง 24 พื้นที่เฝ้าระวังของการประปานครหลวงสาขาสหุธรปราการเพื่อแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องและประสิทธิภาพของกระบวนการที่ได้นำเสนอ

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา (WDNs Model)

แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา เป็นเครื่องมือที่ช่วยตัดสินใจในการบริหารจัดการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก [1] โดยหนึ่งในแบบจำลองที่ได้รับความนิยมที่สุดได้แก่แบบจำลอง EPANET ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงข่ายท่อที่ได้รับการพัฒนาโดยหน่วยงาน Environmental Protection Agency (EPA) ประเทศสหรัฐอเมริกา เนื่องจากไม่มีค่าลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์และสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ทำให้หลายหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในประเทศไทยใช้งานแบบจำลอง EPANET อยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอกระบวนการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์สำหรับโครงข่ายท่อน้ำประปาโดยอัตโนมัติที่สามารถกระทำได้กับแบบจำลอง EPANET เวอร์ชัน 2.0 เท่านั้น โดยข้อดีของแบบจำลองที่ได้หลังจากกระบวนการคือ สามารถจำลองการรั่วไหลในโครงข่ายและสามารถวิเคราะห์การใช้น้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละช่วงเวลาได้ ซึ่งทำให้แบบจำลองที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกับโครงข่ายท่อน้ำประปาจริงมากยิ่งขึ้น

2.2 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)

กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าของตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ภายใต้ข้อจำกัด (Constraints) ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เป็นค่าที่มากที่สุดหรือน้อยที่สุด ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขาวิชารวมถึงสาขาวิศวกรรมศาสตร์

2.3 การประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์

เพื่อให้แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปาสามารถใช้เป็นตัวแทนของโครงข่ายท่อจริงได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์เสียก่อน โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสมที่สุด ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ที่ทำให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัด ดังต่อไปนี้

2.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

กำหนดเป็นการหาค่าที่น้อยที่สุดของ ผลรวมผลต่าง



กำลังสอง (Sum Square of Errors) ของอัตราการไหลที่ได้จากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด และ แรงดันที่จากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

2.3.2 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจเป็นพารามิเตอร์ (Parameter) ของแบบจำลอง โดยงานวิจัยฉบับนี้ทำการแบ่งพารามิเตอร์ออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ 1) พารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด และ 2) พารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบแรงดันจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด สรุปดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปพารามิเตอร์ของแบบจำลองชลศาสตร์

ชนิดพารามิเตอร์	ชื่อพารามิเตอร์	ตัวย่อ
พารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด	สัมประสิทธิ์จำลองการรั่ว Emitter Coefficient	C
	รูปแบบการใช้น้ำ Demand Patterns	d
พารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบแรงดันจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัด	ระดับจุดตรวจวัดแรงดัน Elevations	z
	ความขรุขระของผนังท่อ Roughness	r

2.3.3 ข้อจำกัด (Constraints)

ข้อจำกัดของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ 1) ข้อจำกัดภายในโครงข่ายท่อ และ 2) ข้อจำกัดขอบเขตของตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ก) ข้อจำกัดของระบบ คือ สมดุลของพลังงานและสมดุลมวลในโครงข่ายท่อ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$A_{11}(r,Q) \cdot Q^2 + A_{12}H + A_{10}H_0(z) = 0 \quad (1)$$

$$A_{21}Q - q(d,C) = 0 \quad (2)$$

โดยที่ $A_{11}(r,Q)$ คือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์การสูญเสียเฮด
เฮดการไหลซึ่งเกิดจากแรงเสียดทาน
ภายในระบบ

A_{12} คือ เมทริกซ์การเชื่อมต่อของเส้นท่อและจุด
โหนด

A_{21} คือ เมทริกซ์การเชื่อมต่อของจุดโหนดและเส้นท่อ

A_{10} คือ เมทริกซ์เส้นท่อที่รู้ค่าเฮดการไหลที่จุดโหนดปลายเส้นท่อ

Q คือ เวกเตอร์ของอัตราการไหล

H คือ เวกเตอร์เฮดการไหลที่ไม่ทราบค่า

$H_0(z)$ คือ เวกเตอร์เฮดการไหลที่ทราบค่าซึ่งรวมค่าระดับแล้ว

$q(d,C)$ คือ เวกเตอร์ของความต้องการใช้น้ำซึ่งประกอบด้วยความต้องการใช้น้ำและน้ำสูญเสีย

ซึ่งแบบจำลองชลศาสตร์จำเป็นต้องทำการแก้ปัญหาบนข้อจำกัดทั้งสองนี้พร้อมกันยกตัวอย่าง เช่น แบบจำลอง EPANET ซึ่งสามารถเขียนลดรูปได้ดังสมการที่ (5)

ข) ข้อจำกัดขอบเขตของตัวแปรตัดสินใจ คือ ขอบเขตค่าของตัวแปรตัดสินใจที่สามารถเป็นไปได้ โดยต้องอยู่ภายในขอบเขตบน (Upper Bound) และขอบเขตล่าง (Lower Bound) ดังแสดงให้เห็นดังสมการที่ (6) (7) และ (8)

2.4 แบบจำลองการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Model)

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์, ตัวแปรตัดสินใจ และ ข้อจำกัดทั้งหมดที่ได้กล่าวข้างต้นทำให้สามารถเขียนเป็นแบบจำลองการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองชลศาสตร์ที่ดีที่สุดได้ดังต่อไปนี้ [2-5]

Objective Function:

$$\min_{c,d(t)} = \sum (Q_c^{in} - Q_m^{in})^2 \quad (3)$$

$$\min_{z,r} = \sum (P_{n,c} - P_{n,m})^2 \quad (4)$$

(คำอธิบายเพิ่มเติม: ตัวห้อย c แทนค่าที่ได้จากแบบจำลอง (Calculation) และ m แทนค่าได้จากการตรวจวัด (Measurement))

$$g(C,d,z,r) = 0 \quad (5)$$

$$0 \leq C \leq 1 \quad (6)$$

$$d_{ij} \geq 0 \quad (7)$$

$$100 \leq r_1 \leq 140 \quad (8)$$



โดยที่

Q_c^{in}, Q_m^{in} คือ อัตราการไหลเข้าสู่ระบบจากแบบจำลอง
ภายหลังการปรับตัวแปรตัดสินใจและค่า
ตรวจวัดตามลำดับ (ลบ.ม.)

$P_{n,c}, P_{n,m}$ คือ แรงดันที่จุดตรวจวัดที่ n จากแบบจำลอง
ภายหลังการปรับตัวแปรตัดสินใจและค่า
ตรวจวัดตามลำดับ (ม.)

$g(C, d, z, r)$ คือ แบบจำลองชลศาสตร์ของ EPANET ซึ่ง
เป็นฟังก์ชันของตัวแปรตัดสินใจ

$d_{t,j}$ คือ รูปแบบการใช้น้ำเงื่อนไขที่เวลา t ณ จุด
ผู้ใช้น้ำที่ j

z คือ ค่าระดับของจุดตรวจวัดแรงดัน (ม.)

r_l คือ ค่าความขรุขระของผนัง (Hazen-Williams)
ท่อที่ l

โดยกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่งานวิจัยนี้เลือกใช้
เป็นวิธีของ Brent's Method ที่มีชื่อเรียกว่า Brent's
Minimization ซึ่งเป็นวิธีที่รวมกระบวนการ Parabolic
Interpolation และ Golden-Section Search ไว้ด้วยกันทำ
ให้มีข้อดีคือ 1) สามารถกำหนดขอบเขตของค่าตัวแปร
ตัดสินใจได้ และ 2) ไม่ต้องการฟังก์ชันอนุพันธ์ในการดำเนิน
กระบวนการ ปัจจุบันเครื่องมือที่มีชื่อว่า SciPy เป็นแพ็คเกจ
เสริมบนภาษาไพทอน (Python) มีการรวมกระบวนการ
Brent's Minimization [6] แล้วในฟังก์ชันย่อยที่ชื่อว่า
Minimize_Scalar

2.5 การปรับค่าพารามิเตอร์ (Parameters Adjustment)

2.5.1 ค่าสัมประสิทธิ์จำลองการรั่ว (Emitter
Coefficient: C) ค่าสัมประสิทธิ์จำลองการรั่วเป็นฟังก์ชันของ
แบบจำลอง EPANET เพื่อจำลองสภาวะการรั่วไหลบน
โครงข่ายท่อโดยแปรผันกับแรงดันสามารถเขียนในรูปสมการ
ได้ดังสมการที่ (9)

$$q_i = C \cdot P_i^{N_1} \quad (9)$$

โดยที่ q_i คือ อัตราการไหลของจุดรั่วที่ i

C คือ Emitter Coefficient

P_i คือ ค่าแรงดัน ณ จุดรั่วที่ i

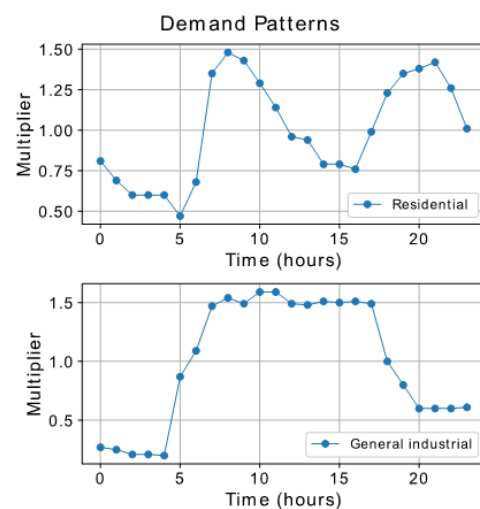
N_1 คือ Emitter Exponent

ซึ่งค่า N_1 เป็นค่าคงที่ โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของท่อ ($N_1=0.5$
เมื่อท่อเป็นเหล็ก, $N_1>1.2$ เมื่อท่อเป็นพลาสติก และ $N_1=1$

เมื่อเป็นวัสดุอื่น ๆ) [7] ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงใช้กระบวนการ
หาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อปรับค่า C ให้ดีที่สุดเพียงค่าเดียว
(กำหนดให้ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1)

2.5.2 รูปแบบการใช้น้ำ (Demand Patterns: $d(t)$)

พฤติกรรมการใช้น้ำนั้นมีความแตกต่างกันตามประเภท
ของผู้ใช้น้ำและเวลาในระหว่างวัน ซึ่งแบบจำลอง EPANET
สามารถทำการจำลองแบบหลายช่วง เวลา (Time Periods)
ได้โดยการนำเวกเตอร์ของรูปแบบการใช้น้ำที่เปลี่ยนแปลง
ตามเวลาคูณกับความต้องการใช้น้ำพื้นฐาน (Base Demand)
ของโหนดผู้ใช้น้ำ ดังนั้นหลายหน่วยงานในประเทศไทยจึงมี
การบันทึกข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยรูปแบบการใช้น้ำตามประเภท
ผู้ใช้และเวลาในรูปแบบตัวคูณ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างรูปแบบการใช้น้ำของบ้านพักอาศัยกับ
อุตสาหกรรมทั่วไป (การประปานครหลวงสาขาสุททโปรการ)
งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอกระบวนการปรับแก้ค่ารูปแบบการ
ใช้น้ำ โดยอ้างอิงกับข้อมูลการใช้น้ำเฉลี่ยของผู้ใช้แต่ละ
ประเภทตามที่มีการบันทึกไว้เท่านั้น โดยมีกระบวนการหาค่า
ปรับแก้ดังต่อไปนี้

1) ประเมินรูปแบบการจ่ายน้ำเข้าสู่โครงข่ายท่อที่ได้จาก
แบบจำลองและการตรวจวัด ดังสมการที่ (9) และ (10)
ตามลำดับ

$$P_{c,t}^{in} = Q_{c,t}^{in} / \overline{Q_c^{in}} \quad (9)$$

$$P_{m,t}^{in} = Q_{m,t}^{in} / \overline{Q_m^{in}} \quad (10)$$

โดยที่

$P_{c,t}^{in}, P_{m,t}^{in}$ คือ รูปแบบการจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบจากแบบ
จำลองและการตรวจวัด ณ เวลาที่ t



$Q_{c,t}^{in}, Q_{m,t}^{in}$ คือ อัตราการไหลเข้าสู่ระบบจากแบบจำลอง และการตรวจวัด ณ เวลาที่ t

$\overline{Q_c^{in}}, \overline{Q_m^{in}}$ คือ ค่าเฉลี่ยอัตราการไหลเข้าสู่ระบบจากแบบจำลองและการตรวจวัด

2) คำนวณค่าปรับแก้รูปแบบการใช้น้ำ ดังสมการที่ (11)

$$K_t = (\Delta Pt - \overline{\Delta Pt}) * R \quad (11)$$

โดยที่

K_t คือ ค่าปรับแก้ ณ เวลาที่ t

ΔPt คือ ผลต่างรูปแบบการจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบจาก

การตรวจวัดและแบบจำลอง $P_{m,t}^{in} - P_{c,t}^{in}$

$\overline{\Delta Pt}$ คือ ค่าเฉลี่ยของผลต่างรูปแบบการจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบจากการตรวจวัดและแบบจำลอง

$$\frac{P_{m,t}^{in} - P_{c,t}^{in}}{P_{m,t}^{in} - P_{c,t}^{in}}$$

ซึ่งค่า R คือ อัตราส่วนลดความแปรปรวน มีหน้าที่สำคัญในการป้องกันการลู่ออกจากคำตอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีทางจ่ายน้ำเข้าหลายทาง เนื่องจากการเปรียบเทียบอัตราการไหลระหว่างค่าตรวจวัดกับแบบจำลองจะกระทำบนทางจ่ายน้ำเข้าหลักเท่านั้น ส่วนทางเข้าที่เป็นการไหลเข้าจากระบบข้างเคียงหรือทางเข้าร่องจะถูกบังคับให้เป็นไปตามค่าตรวจวัด ดังนั้นค่าปรับแก้รูปแบบการใช้น้ำจึงอ้างอิงกับอัตราการไหล ณ ทางเข้าหลักเท่านั้น

จึงต้องมีค่าอัตราส่วนลดความแปรปรวนโดยคำนึงถึงอิทธิพลของทางจ่ายน้ำเข้าที่เหลือเพื่อรับรองการลู่เข้าสู่คำตอบ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (12)

$$R = \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^{N_{in}} (Q_{m,i}^{in})_t}{2 \cdot \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^{N_{in}} (Q_c^{in,i})_t} \quad (12)$$

โดยที่ N_{in} คือ จำนวนทางน้ำเข้าทั้งหมด

T คือ เวลาทั้งหมดของแบบจำลอง

$(Q_m^{in,i})_t$ คือ ค่าอัตราการไหลจากการตรวจวัด ณ จุดทางเข้าที่ i เวลาที่ t

$(Q_c^{in,i})_t$ คือ ค่าอัตราการไหลจากแบบจำลอง ณ จุดทางเข้าที่ i เวลาที่ t

3) คำนวณค่ารูปแบบการใช้น้ำใหม่สำหรับจุดผู้ใช้น้ำในระบบ ดังสมการที่ (13)

$$(d_{t,j})_i = \frac{(d_{t,j})_{i-1} + K_t}{(d_j)_{i-1}} \quad (13)$$

โดยที่

$(d_{t,j})_i$ คือ รูปแบบการใช้น้ำที่เวลา t ณ จุดผู้ใช้น้ำ j หลังการปรับแก้ครั้งที่ i ($d_{t,j}$ ค่าใหม่)

$(d_{t,j})_{i-1}$ คือ รูปแบบการใช้น้ำที่เวลา t ณ จุดผู้ใช้น้ำ j ก่อนหน้าการปรับแก้ครั้งที่ i ($d_{t,j}$ ค่าเดิม)

$\overline{(d_j)_{i-1}}$ คือ ค่าเฉลี่ยรูปแบบการใช้น้ำ ณ จุดผู้ใช้น้ำ j ครั้งที่ $i-1$

ซึ่งค่ารูปแบบการใช้น้ำใหม่ที่ได้นั้นต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0 เนื่องจาก ค่าต้องการใช้น้ำที่เป็นลบในแบบจำลอง EPANET มีความหมายว่าเป็นน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบ (คำอธิบายเพิ่มเติม: ในการปรับแก้ค่ารูปแบบการใช้น้ำครั้งแรก i เท่ากับ 1 ค่ารูปแบบการใช้น้ำเดิม $(d_{t,j})_0$ จะหมายถึง ค่ารูปแบบการใช้น้ำที่หน่วยงานได้ทำการบันทึกไว้)

2.5.3 ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดัน (Elevations: z)

เนื่องจากข้อมูลระดับของจุดตรวจวัดแรงดันของหลายหน่วยงานจะอาศัยข้อมูลจาก Digital Elevation Model (DEM) ซึ่งความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของภาพถ่ายจากดาวเทียม ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอวิธีการปรับแก้ค่าระดับโดยอ้างอิงกับค่าแรงดันที่ตรวจวัดได้จริง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังสมการที่ (14)

$$(z_n)_i = (z_n)_{i-1} + \overline{(P_{n,c} - P_{n,m})} \quad (14)$$

โดยที่

$(z_n)_i$ คือ ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดันที่ n หลังการปรับแก้ครั้งที่ i (z_n ค่าใหม่)

$(z_n)_{i-1}$ คือ ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดันที่ n ก่อนหน้าการปรับแก้ครั้งที่ i (z_n ค่าเดิม)

$\overline{(P_{n,c} - P_{n,m})}$ คือ ค่าเฉลี่ยผลต่างแรงดันจากแบบจำลอง กับค่าตรวจวัด ณ จุดตรวจวัดที่ n

(คำอธิบายเพิ่มเติม: ในการปรับแก้ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดันครั้งแรก i เท่ากับ 1 ค่าระดับเดิม $(z_n)_0$ จะหมายถึง ค่าระดับที่หน่วยงานได้ทำการบันทึกไว้)

2.5.3 ค่าความขรุขระของผนังท่อ (Roughness: r)

งานวิจัยฉบับนี้ใช้ค่าความขรุขระของผนังท่อตามทฤษฎีของ Hazen-Williams ซึ่งจะแบ่งตามชนิดวัสดุท่อโดยค่าที่สูงหมายถึงผนังท่อมีความขรุขระต่ำ แต่ในการใช้งานจริงท่อจะเกิดการกัดกร่อนบริเวณผนังส่งผลให้เมื่อท่อมีอายุการใช้งานที่



นานขึ้นก็จะทำให้ความขรุขระผนังท่อนั้นสูงขึ้นตามไปด้วย โดยในพื้นที่ของการประปานครหลวง (กปน.) สาขาสมุทรปราการ ตามรายงานที่ปรากฏของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ปี พ.ศ.2562 [9] ได้ทำการประเมินการลดลงของค่าความขรุขระผนังท่อ Hazen-Williams ของท่อทุกชนิด พบว่าค่าความขรุขระของผนังท่อจะลดลงเท่ากับอายุท่อซึ่งจะไม่ต่ำกว่าค่าที่ต่ำที่สุดตามวิธีของ Hazen-Williams ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเสนอการปรับแก้ค่าความขรุขระของผนังท่อ ดังสมการที่ (15)

$$r_l = M \cdot (r_{max,l} - Age_l) \quad (15)$$

โดยที่ M คือ ตัวคูณปรับแก้
 $r_{max,l}$ คือ ค่าความขรุขระผนังท่อที่สูงที่สุดของเส้นท่อที่ l
 Age_l คือ อายุของเส้นท่อที่ l

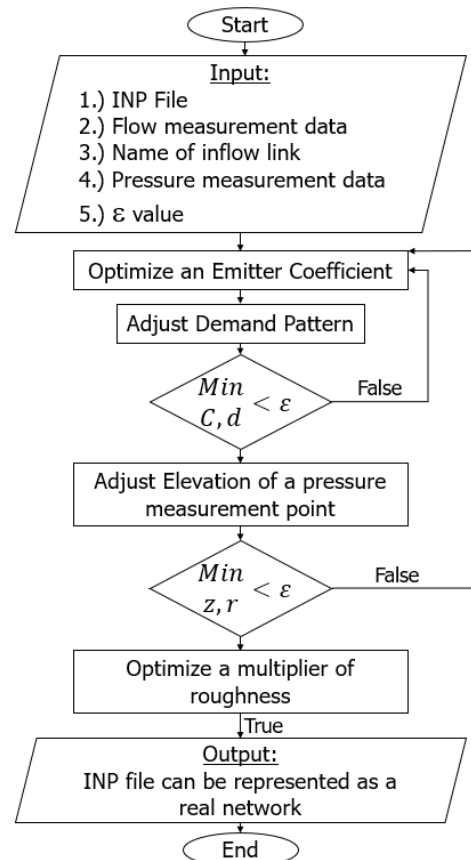
โดยใช้กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการหาค่า M เพียงค่าเดียวเท่านั้น (กำหนดให้ค่า r_l ที่ได้อยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 140 เนื่องจากท่อส่วนใหญ่ในระบบ DMA เป็นชนิด PVC)

2.6 กระบวนการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์อัตโนมัติ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการพัฒนาชุดคำสั่งสำหรับการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์บนภาษาไพทอน โดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Water Network Tool for Resilience (WNTR) [8] เพื่อดึงผลลัพธ์แบบจำลอง EPANET โดยชุดคำสั่งที่พัฒนามีกระบวนการทำงาน 9 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ยอมรับได้ (ϵ)
- 2) นำเข้าไฟล์แบบจำลอง EPANET (.inp), ไฟล์ตรวจวัดอัตราการไหลและแรงดัน (.dat) และกรอกชื่อจุดจ่ายน้ำเข้าหลัก
- 3) หาค่าเหมาะสมที่สุดของสัมประสิทธิ์จำลองการรั่ว
- 4) ปรับแก้ค่ารูปแบบการใช้น้ำ
- 5) ทำซ้ำกระบวนการที่ 3 และ 4 จนกว่าค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ส่วนอัตราการไหลมีค่าน้อยกว่าค่า ϵ ที่กำหนด
- 6) ปรับแก้ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดัน
- 7) หาค่าตัวคูณ M ที่ทำให้ความขรุขระผนังท่อเหมาะสมที่สุด
- 8) ตรวจสอบค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ส่วนแรงดันหากค่ามากกว่าค่า ϵ ที่กำหนดให้ดำเนินการต่อตามขั้นตอนที่ 9

9) ทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 3 จนค่า ϵ สองส่วนน้อยกว่าที่กำหนดจากที่กล่าวข้างต้นสรุปกระบวนการทำงานได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังกระบวนการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

โครงข่ายท่อน้ำประปาจังหวัดสมุทรปราการ เป็นหนึ่งในพื้นที่ให้บริการของ กปน. จากข้อมูลรายงานประจำปีพ.ศ. 2561 มีพื้นที่ให้บริการ 274.60 ตร.กม. ผู้ใช้น้ำ 195,872 ราย และ น้ำผลิตจ่ายภายในสาขา 198.49 ล้าน ลบ.ม. โดยมีน้ำจำหน่ายรวม 141.65 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งเป็นน้ำสูญเสียเท่ากับ 56.84 ล้าน ลบ.ม. คิดเป็นร้อยละ 28.64 และมีการแบ่งระบบออกเป็นพื้นที่เฝ้าระวัง (District Metered Area: DMA) ทั้งหมด 70 พื้นที่ งานวิจัยฉบับนี้ได้ทดลองใช้กระบวนการสอบเทียบแบบจำลองกับทั้งหมด 24 พื้นที่ ซึ่งจะยกตัวอย่าง 1 พื้นที่ เพื่ออภิปรายผลลัพธ์ที่ได้โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2



ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างพื้นที่ศึกษา

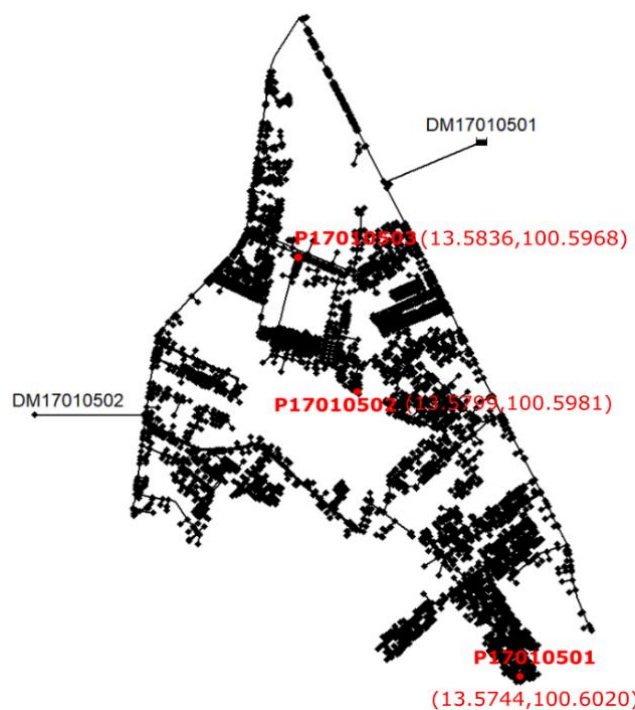
รหัสพื้นที่ (DMA)	จุดจ่ายน้ำเข้า	ความยาวท่อ (กม.)	ผู้ใช้น้ำ (ราย)	น้ำสูญเสีย (%)
170105	2	24.9	2,297	31.9

ตารางที่ 3 ข้อมูลนำเข้าชุดคำสั่งกระบวนการสอบเทียบ

ชื่อจุดทางจ่ายน้ำเข้าหลัก	c ของอัตราการไหล (ลบ.ม./ชม.) ²	c ของแรงดัน (ม.) ²	เวลา (ชม.)
DM17010501	100	10	24

* c เป็นค่าผลรวมผลต่างกำลังสอง

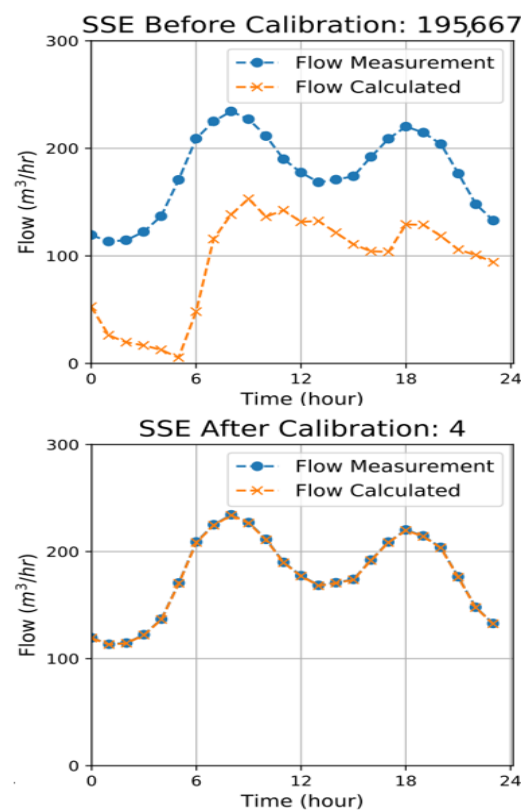
ทำให้ได้ผลลัพธ์ของแบบจำลองเชิงพื้นที่ดังแสดงในตารางที่ 4 และ ผลลัพธ์ของแบบจำลองรายชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5



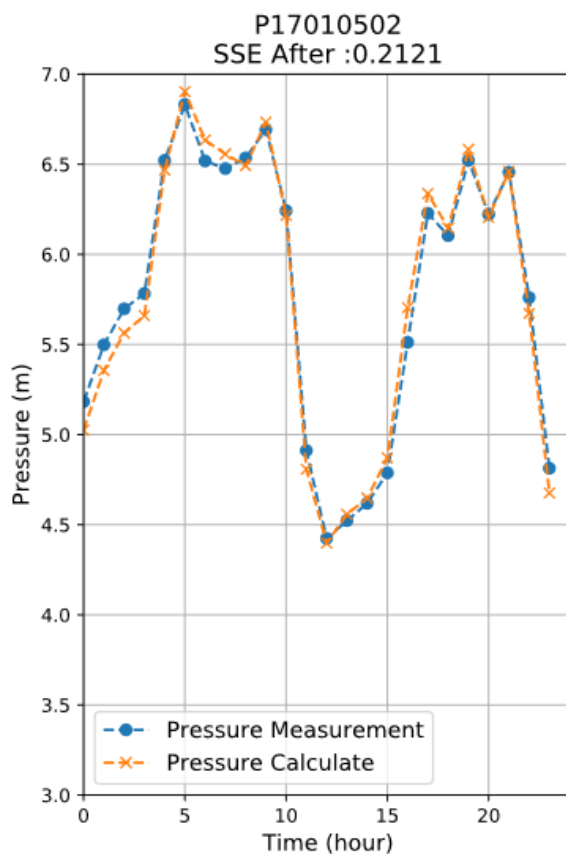
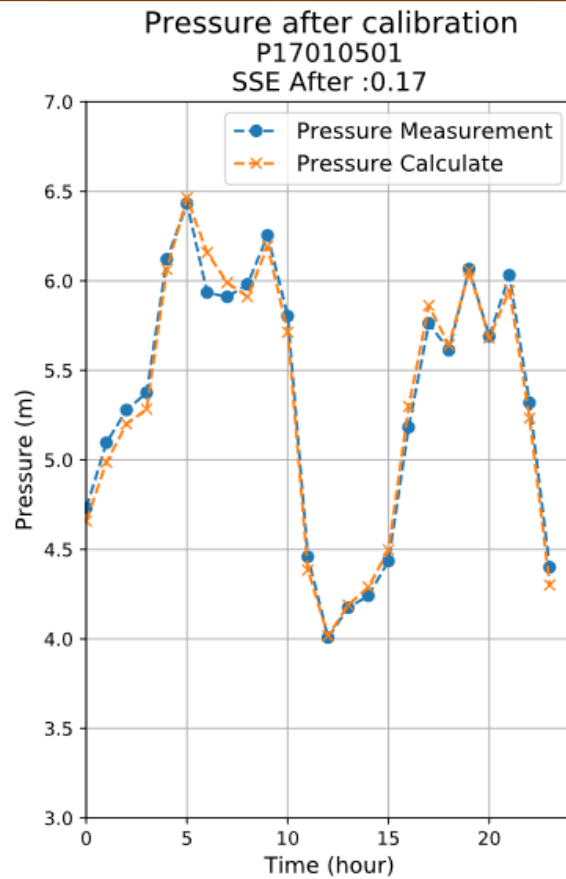
รูปที่ 3 แบบจำลองโครงข่ายท่อบน EPANET ของพื้นที่ศึกษา
ผลลัพธ์ของแบบจำลองชลศาสตร์ที่ได้ภายหลังการใช้ชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้น ซึ่งกำหนดให้ข้อมูลนำเข้าเป็นตามตารางที่ 3

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์แบบจำลองชลศาสตร์เชิงพื้นที่

อัตราการไหลเข้าสู่ระบบทั้งหมดจากการตรวจวัด (ลบ.ม./วัน)	อัตราการไหลเข้าสู่ระบบทั้งหมดจากแบบจำลอง (ลบ.ม./วัน)	ผลต่าง (ลบ.ม./วัน)	ร้อยละผลต่าง (%)
6,319.07	6,306.78	12.29	0.19
การเปรียบเทียบอัตราการไหล ณ จุดจ่ายน้ำเข้า	ค่าความคลาดเคลื่อน	ก่อนการสอบเทียบ	หลังการสอบเทียบ
	SSE (ลบ.ม./ชม.) ²	195,667	4
	RMSE (ลบ.ม./ชม.)	90.29	0.41
การเปรียบเทียบแรงดัน ณ จุดตรวจวัดแรงดัน (3 จุดตรวจวัด)	ค่าความคลาดเคลื่อน	ก่อนการสอบเทียบ	หลังการสอบเทียบ
	Sum Square of Errors: SSE (ม.) ²	83.86	0.17
		54.78	0.21
		56.37	0.06
	Root Mean Square Errors: RMSE (ม.)	1.87	0.08
		1.51	0.09
		1.53	0.05



รูปที่ 4 ค่าอัตราการไหล ณ ทางจ่ายน้ำเข้าหลักที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ก่อนและหลังการสอบเทียบแบบจำลอง

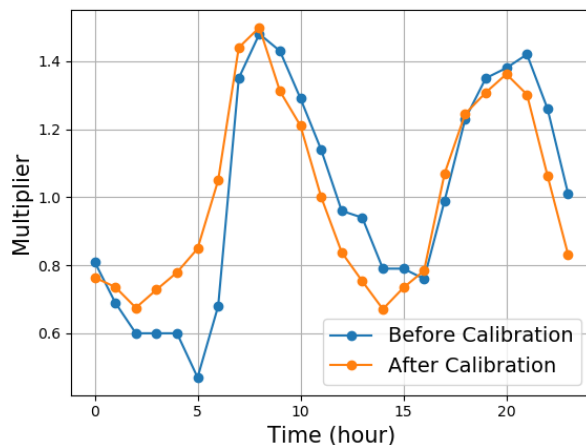


รูปที่ 5 ค่าแรงดัน ณ จุดตรวจวัดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหลังการสอบเทียบแบบจำลอง (จุดตรวจวัดที่ 1 และ 2) โดยค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ได้ภายหลังกระบวนการสอบเทียบมีรายละเอียดดังตารางที่ 5



ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลภายหลังการสอบเทียบแบบจำลอง

Emitter Coefficient		0.002513				
Demand Pattern (ยกตัวอย่าง บ้านพัก อาศัย)	ชม.	0	1	2	3	4
		0.764	0.736	0.675	0.728	0.779
	ชม.	5	6	7	8	9
		0.849	1.050	1.440	1.499	1.312
	ชม.	10	11	12	13	14
		1.210	1.001	0.838	0.753	0.671
	ชม.	15	16	17	18	19
		0.734	0.784	1.070	1.245	1.308
	ชม.	20	21	22	23	
		1.362	1.302	1.063	0.831	



รูปที่ 6 ตัวอย่างรูปแบบการใช้น้ำของบ้านพักอาศัยก่อนและหลังสอบเทียบแบบจำลอง

ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบแรงดันที่ได้ภายหลังกระบวนการสอบเทียบมีรายละเอียดดังตารางที่ 6

4. บทสรุป

จากผลการศึกษาที่กล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากระบวนการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอ สามารถทำงานกับโครงข่ายท่อน้ำประปาจริงได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ โดยผลลัพธ์ของตัวอย่างพื้นที่ศึกษารหัส 170105 ซึ่งเป็นโครงข่ายท่อน้ำประปาภายใต้การบริหารของการประปานครหลวงสาขาสุมทราการ แสดงให้

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเพื่อเปรียบเทียบแรงดันภายหลังการสอบเทียบแบบจำลอง

Elevation (ม.)	P17010501	P17010502	P17010503
	1.514	1.302	1.465
ชื่อ	P-170105-1	P-170105-2	P-170105-3
	116.905	130.431	112.074
Roughness (ยกตัวอย่าง 9 ท่อแรก)	P-170105-4	P-170105-5	P-170105-6-1
	114.006	127.533	122.701
ชื่อ	P-170105-7	P-170105-8	P-170105-9-1
	121.736	121.736	114.006

เห็นว่าค่าอัตราการไหลและแรงดันจากแบบจำลองก่อนการสอบเทียบแบบจำลองมีค่าผลรวมผลต่างกำลังสอง (SSE) เท่ากับ 195,667 (ลบ.ม./ชม.)² และ 195.01 เมตร² ตามลำดับ โดยภายหลังกระบวนการสอบเทียบแบบจำลองนำเสนอพบว่าค่าผลรวมผลต่างกำลังสองของอัตราการไหลและแรงดันลดลงเป็น 4 (ลบ.ม./ชม.)² และ 0.44 (เมตร)² ตามลำดับ โดยที่ได้ค่า Emitter Coefficient ภายหลังการสอบเทียบแบบจำลองเท่ากับ 0.002513 และค่าระดับของจุดตรวจวัดแรงดันทั้ง 3 จุดภายหลังการสอบเทียบแบบจำลองเท่ากับ 1.514, 1.302, 1.465 เมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามหากค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดันได้ทำการบันทึกโดยตรงอาจจะส่งผลให้การสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์มีความแม่นยำที่ดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนพัฒนานวัตกรรมปริญญาโท ประจำปี 2561 รหัส 61/01/WRE/Innovation คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบพระคุณการประสานครหลวงสำหรับข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lipiwattanakarn S, Kaewsang S, Charuwimolkul N, Changklom J, Pornprommin A. theoretical estimation of energy balance components in water networks for top-down approach. Water. 2021 Jan;13(8):1011.
- [2] Zhang Q, Zheng F, Duan HF, Jia Y, Zhang T, Guo X. Efficient numerical approach for simultaneous calibration of pipe roughness coefficients and nodal demands for water distribution systems. JWater Resour Plan Manag. 2018 Oct 1;144(10):04018063.
- [3] Jadhao RD, Gupta R. Calibration of water distribution network of the Ramnagar zone in Nagpur City using online pressure and flow data. Appl Water Sci. 2018 Mar 1;8(1):1–10.
- [4] Khedr A. Automated Calibration of Real Water Distribution Networks: City X Case Study. Masters thesis. University of Waterloo, Ontario; 2016.
- [5] Ormsbee LE. Implicit network calibration. J Water Resour Plan Manag. 1989 Mar 1;115(2):243–57.
- [6] Brent RP. Algorithms for minimization without derivatives, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall; 1973, p.195.
- [7] Sabbagh K, Safri A, Zabot M. Pre-Localization approach of leaks on a water distribution network by optimization of the hydraulic model using an evolutionary algorithm. MDPI Water. 2018;588:1-9
- [8] Sharp WW, Walski TM. Predicting internal roughness in water mains. J - Am Water Works Assoc. 1988 Nov;80(11):34–40.