แบบจำลองระบบโครงข่ายท่อประปาของการประปานครหลวง

พงศ์ธร หงษา[1] และ เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์[2*]
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แขวงบางเขน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

** Corresponding Author: fengmms@ku.ac.th*
[1] นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
[2] รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

ประวัติบทความ :
รับเพื่อพิจารณา : 15 สิงหาคม 2565
แก้ไข : 13 กุมภาพันธ์ 2566
ตอบรับ : 3 มีนาคม 2566
DOI : 10.14456/kmuttrd.2023.5

คำสำคัญ : การจำลองโครงข่ายท่อประปา / EPANET / ArcMap / มหาสวัสดิ์ / บางบัวทอง

บทคัดย่อ

งานศึกษานี้เป็นการสร้างแบบจำลองระบบโครงข่ายท่อประปาด้วยโปรแกรม EPANET โดยใช้ข้อมูลโครงข่ายท่อประปาในพื้นที่ให้บริการน้ำประปาของการประปานครหลวง สำนักงานประปาสาขามหาสวัสดิ์ และสาขาบางบัวทอง ทั้งนี้ปรับเทียบแบบจำลองกับค่าในสนามโดยใช้ข้อมูลสมดุลปริมาณการใช้น้ำและแรงดันน้ำ ข้อมูลปริมาณน้ำจ่ายและแรงดันน้ำจากสถานีสูบจ่ายน้ำ ข้อมูลปริมาณน้ำและแรงดันน้ำจากตู้เครื่องวัด (RTU) ในพื้นที่เฝ้าระวังน้ำสูญเสีย (DMA) และจากมิเตอร์น้ำหลัก (Master Meter) จากผลการปรับเทียบ พบว่า แบบจำลองให้ค่าความแตกต่างของปริมาณน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 0.005 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน 0.00002 ค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบค่าเฉลี่ยความผิดพลาด เท่ากับ 3.317 และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง เท่ากับ 3.829 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เชิงเส้นเท่ากับ 1.00 ส่วนค่าความแตกต่างของแรงดันเฉลี่ยเท่ากับ 0.15 เมตร คิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน 3.04 ค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเท่ากับ 0.289 ส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง เท่ากับ 0.653 และค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เชิงเส้นเท่ากับ 0.946

Water Distribution Network Model of Metropolitan Waterworks Authority

Pongthon Hongsa[1] and Muanmas Wichiensin[2*]

Kasetsart University, Bang Khen, Jatujak, Bangkok 10900

** Corresponding Author: fengmms@ku.ac.th*

[1] Graduate Student, Infrastructure Engineering and Management Program, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

[2] Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:
Received: August 15, 2022
Revised: February 13, 2023
Accepted: March 3, 2023
DOI : 10.14456/kmuttrd.2023.5

Keywords: Water Distribution Network Model / EPANET / ArcMap / Maha Sawat / Bang Bua Thong

Abstract

The present study involved the development of a water distribution network model using EPANET program; information of the water networks from the Maha Sawat Waterworks Office and Bang Bua Thong Branch was used. The model was calibrated against the field data based on the balance of water usage and water pressure, the water supply and water pressure data from water supply stations as well as the water volume and water pressure from the district monitoring areas and master meters. The results showed that the difference between the predicted and measured average flow rates was 0.005 CMH. Percentage error was noted to be 0.00002, while the mean error was 3.317; root mean square error (RMSE) was 3.829 and the linear correlation coefficient was 1.00. In terms of the mean pressure, the difference was 0.15 m. Percentage error was 3.04, while the mean error was 0.289; RMSE was 0.653 and the linear correlation coefficient was 0.946.

1. บทนำ

พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลเป็นพื้นที่มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะพื้นที่จังหวัดนนทบุรีฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งประกอบด้วย อำเภอมหาสวัสดิ์ และอำเภอบางบัวทอง การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อรองรับการเติบโตของจำนวนประชากรจึงเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นระบบสาธารณูปโภคน้ำประปา ซึ่งเป็นหนึ่งในโครงสร้างพื้นฐาน จึงเป็นสิ่งที่ต้องพัฒนาไปพร้อมกับโครงสร้างพื้นฐานอื่นด้วยเช่นกัน

การประปานครหลวงเป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจสังกัดกระทรวงมหาดไทย ดำเนินกิจการองค์กรให้บริการน้ำประปาในเขตพื้นที่ 3 จังหวัด ประกอบด้วย กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ รวมพื้นที่ 3,195 ตารางกิโลเมตร มีปริมาณน้ำจ่ายเฉลี่ยประมาณ 5.80 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน จากสถิติเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณน้ำจ่ายสูงสุดต่อวันระหว่าง พ.ศ. 2560-2565 [1] พบว่าปริมาณน้ำจ่ายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจาก 5.60 ล้านลูกบาศก์เมตร เป็น 6.12 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 9.28 ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณความต้องการในการใช้น้ำที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเกิดการสูญเสียน้ำในระบบ จากการแตกรั่ว ส่งผลให้ปริมาณแรงดันเฉลี่ยรวมทั้งพื้นที่ลดลงจาก 9.95 ม. เป็น 6.70 ม. คิดเป็นร้อยละ 32.66

จากการตรวจสอบปริมาณการจ่ายน้ำที่เข้าสู่ระบบของโรงสูบจ่ายน้ำมหาสวัสดิ์ต่อวัน [2] เปรียบเทียบระหว่าง พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2565 พบว่า ปริมาณการจ่ายน้ำเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม 445,416 ลูกบาศก์เมตร เป็น 629,239 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 41.27 ด้วยภารกิจของการประปานครหลวง ซึ่งมีหน้าที่ในการให้บริการน้ำประปา ให้เพียงพอต่อความต้องการของประชากรในพื้นที่ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงระบบโครงข่ายท่อประปาให้มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องศึกษาวิจัยและพัฒนาแบบจำลองระบบโครงข่ายท่อประปา เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางชลศาสตร์ในท่อประปา และหาแนวทางในพัฒนาปรับปรุงโครงข่ายท่อประปาเพื่อเพิ่มเสถียรภาพและศักยภาพในการสูบจ่ายน้ำประปาต่อไป

2. จุดประสงค์และขอบเขตของงาน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองระบบโครงข่ายท่อประปา เพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุงระบบโครงข่ายท่อประปาให้สอดคล้องและเหมาะสม กับการรับมือสถานการณ์ต่าง ๆ ที่มีโอกาสอาจจะเกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา

ขอบเขตของงาน ศึกษาในพื้นที่ให้บริการน้ำประปาของสำนักงานประปาสาขามหาสวัสดิ์ และสาขาบางบัวทอง ช่วงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2564 แสดงดังรูปที่ 1 ในส่วนระบบโครงข่ายท่อประปา มีขอบเขตศึกษาระบบสูบจ่ายน้ำของท่อประปาตั้งแต่ขนาด 400 มม. ถึง 1,800 มม.

รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาสำนักงานประปาสาขามหาสวัสดิ์และสาขาบางบัวทอง

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองระบบโครงข่ายท่อประปา (Water Distribution Network Simulation Model) เป็นการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งแสดงพฤติกรรมการไหลในเส้นท่อภายใต้แรงดัน โดยมีพื้นฐานมาจาก นิยามการจำแนกประเภทของการไหลในท่อภายใต้แรงดัน

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\upsilon}$$

R_e = Reynolds number

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

V = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ (m/s)

μ = ความหนืดจลน์ (Dynamic viscosity)

ของของเหลว ($N{\cdot}s/m^2$)

υ = ความหนืดเปรียบเทียบ (Kinematic viscosity) ของของเหลว (m^2/s)

โดยทั่วไปจะจำแนกชนิดของการไหลตามค่า ดังนี้คือ

R_e< 2000 การไหลในท่อจะเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) เส้นแนวการไหลจะราบเรียบ

2000 < R_e < 4000 การไหลจะเป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลง (transition) จากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) เส้นแนวการไหลจะพลิ้วไหว

R_e > 4000 เส้นแนวการไหลในท่อจะเป็นแบบปั่นป่วนสมบูรณ์

สมการการไหลต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$Q_{in} = Q_{out}$$

Q_{in} = อัตราการไหลเข้าที่หน้าตัดควบคุมทางเข้า (m^3/s)

Q_{in} = อัตราการไหลออกที่หน้าตัดควบคุมทางออก (m^3/s)

สมการสมดุลพลังงาน (Energy Balance)

$$E_{in} = E_{out}$$

โดยที่ $E_{in} = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}$

และ $E_{out} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f$

E_{in} = พลังงานที่หน้าตัดทางเข้า (m)

E_{in} = พลังงานที่หน้าตัดทางออก (m)

$Z_{1,2}$ = เฮดระดับ ณ ตำแหน่งทางเข้า-ทางออก (Elevation Head) (m)

$\frac{P_1}{\gamma}, \frac{P_2}{\gamma}$ = เฮดแรงดัน ณ ตำแหน่งทางเข้า-ทางออก (Pressure Head) (m)

P = ค่าแรงดัน (N/m^2)

γ = น้ำหนักจำเพาะของของเหลว (N/m^3)

$\frac{v_1^2}{2g}, \frac{v_2^2}{2g}$ = เฮดความเร็ว ณ ตำแหน่งทางเข้า - ทางออก (Velocity Head) (m)

V = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ (m/s)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s^2)

h_f = พลังงานสูญเสีย (Head Loss) (m)

สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\Sigma F = \rho Q(V_{out} - V_{in})$$

ΣF = ผลรวมของแรง (N-m)

Q = อัตราการไหลในท่อ (m^3/s)

V_{out} = ความเร็วของการไหลที่หน้าตัดทางออก (m/s)

V_{in} = ความเร็วของการไหลที่หน้าตัดทางเข้า (m/s)

ในการวิเคราะห์ส่วนใหญ่ จะอาศัยสมการการไหลต่อเนื่องและสมการสมดุลพลังงานเป็นหลัก ส่วนสมการโมเมนตันจะใช้ก็ต่อเมื่อต้องการคำนวณหาแรงที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราโมเมนตัมเนื่องจากหน้าตัดหรือความเร็วเปลี่ยนขนาดและทิศทางเท่านั้น

ทฤษฎีการสูญเสียพลังงานหลัก (Major head loss)

สูตรของ Hazen - Williams

$$V = 0.85CR^{0.63}S^{0.54}$$

V = ความเร็วของการไหลในท่อ (m/s)

C = สัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นกับชนิดของท่อ

R = รัศมีชลศาสตร์ = A/P = D/4 เมื่อน้ำไหลเต็มท่อ (m)

S = ค่าการสูญเสียหัวแรงดันเนื่องจากความฝืดต่อหนึ่งหน่วยความยาวของท่อ

L = ความยาวของท่อ (m)

โดยที่ $S = \frac{H_f}{L}$ = *หรือ* $H_f = SL$

ทฤษฎีการสูญเสียพลังงานรองในท่อ (Minor head loss)

$$H_m = \frac{KV^2}{2g}$$

H_m = ค่าการสูญเสียหัวแรงดันเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ (m)

K = สัมประสิทธิ์ของความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์

การจำลองการรั่วในเส้นท่อที่จุดต่อบรรจบ (Emitter)

$$Q = CP^{\gamma}$$

C = ค่าสัมประสิทธิ์การไหล

γ = เลขยกกำลังของแรงดันสำหรับหัว nozzle หรือ sprinkle = 0.5 และโดยทั่วไปโรงงานผู้ผลิตจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลในหน่วยของ gpm/psi$^{-0.5}$ (ระบุอัตราการไหลผ่านอุปกรณ์ที่ความดันลด 1 psi)

การวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำ (Analysis of Water Distribution Network) ใช้วิธี Gradient Method ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้แก้ปัญหาการไหลในระบบท่อส่งน้ำ และใช้ลักษณะทางชลศาสตร์ในแต่ละช่วงเวลาที่เกิดขึ้นในระบบท่อส่งน้ำแสดงเป็นสมการอยู่ในรูปของ Node และ Loop โดย Todini and Filati [3] เรียกชื่อวิธีการนี้ว่า “Gradient Method” โดยมีหลักการดังนี้ สมมติในระบบท่อส่งน้ำมีจำนวนจุดแยกทั้งหมด N node และ NF คือจุดที่กำหนดระดับพลังงาน (อ่างเก็บน้ำ ถังสูง และสถานีสูบน้ำ) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล-Head Loss ในเส้นท่อระหว่างจุด และ ได้ดังนี้

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^{n} + mQ_{ij}^{n}$$

i = Node ใด ๆ

j = Node ที่ถัดไปจาก Node

H_i, H_j = ค่า Head ที่จุดต่าง ๆ (Nodal Head) (m)

H_{ij} = Head Loss (m) จาก Node ไป

r = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Resistance Coefficient)

Q_{ij} = อัตราการไหล (m^3/s) จาก Node ไป

m = สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (Minor Loss Coefficient)

n = Pump Curve Coefficient

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนี้จะขึ้นอยู่กับสมการที่ใช้คำนวณหาค่า Head Loss ในกรณีที่เป็นเครื่องสูบน้ำ ค่า Head Loss (จะมีค่าลบเนื่องจากเป็น Head ที่ใส่เข้าไปในระบบ) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Power Law ได้ดังนี้

$$h_{ij} = -\omega^2\left(h_0 - r\left(\frac{Q_{ij}}{\omega}\right)^{n}\right)$$

h_0 = ค่า Head ของเครื่องสูบน้ำ (m)

ω = ความเร็วสัมพัทธ์ที่กำหนด (m/s)

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0$$

$$\text{for } i = 1, \ldots N$$

ขั้นต่อมาสามารถสรุปสมการการไหลรอบ Node ใด ๆ ทั้งหมดจากสมการการไหลต่อเนื่อง (Flow Continuity)

D_1 = ความต้องการน้ำ (m^3) ที่จุด หรือน้ำที่ไหลเข้ามาในระบบ (ในกรณีที่น้ำไหลเข้ามาเครื่องหมายเปลี่ยนเป็นบวก)

หากทราบค่าเริ่มต้นที่จุดกำหนดจุดใด ๆ แล้ว จะสามารถคำนวณหาค่า H_i, H_j , H_{ij} ที่จุดใด ๆ ได้ตามสมการ Head loss และ Flow Continuity การคำนวณโดยวิธี Gradient Method จะเริ่มต้นโดยในครั้งแรกจะประมาณค่าอัตราการไหลในแต่ละท่อตามสมการการไหลต่อเนื่องและทำการคำนวณแบบวนซ้ำ ค่า Head ที่คำนวณได้ในครั้งใหม่สามารถเขียนให้อยู่ในรูป Matrix ได้ดังนี้

$$[A][H] = [F]$$

$[A]$ = Jacobian Matrix ขนาด N x N

$[H]$ = Vector Matrix ขนาด N x 1 ของตัวที่ไม่ทราบค่า คือ Nodal Head

$[AF]$ = Vector Matrix ขนาด N x 1 ของเทอมที่อยู่ฝั่งขวาของสมการ

แนวเส้นทแยงมุมของ Jacobian Matrix กำหนดให้เป็น

$$A_{ii} = \sum_j p_{ij}$$

และส่วนที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ หรือไม่ใช่แนวเส้นทแยงมุมของ Matrix จะมีค่า

$$A_{ij} = -p_{ij}$$

P_{ij} = ส่วนกลับของค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของค่า Head Loss ที่เชื่อมต่อระหว่างจุด และ ในกรณีที่เป็นท่อ

$$p_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|}$$

ในกรณีที่เป็นเครื่องสูบน้ำ

$$p_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r(Q_{ij}/\omega)^{n-1}}$$

ส่วนเทอมทางขวามือของสมการ [A] [H]= [F] จะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลสุทธิที่ไม่สมดุลในแต่ละจุดที่หาค่าร่วมกับค่าอัตราการไหลที่คูณด้วยเวกเตอร์ปรับแก้ จะเท่ากับ

$$F_i = \left(\sum_j Q_{ij} - D_i\right) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f$$

เมื่อใช้กับช่วงท่อใด ๆ ที่เชื่อมระหว่างจุด i กับจุด f รอบข้างที่ติดกับจุด i ซึ่งไม่ใช่จุด j ค่าเวกเตอร์ปรับแก้อัตราการไหล y_{ij} ในกรณีที่เป็นท่อจะเท่ากับ

$$y_{ij} = p_{ij}(r|Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2)sng(Q_{ij})$$

ในกรณีที่เป็นเครื่องสูบน้ำ

$$y_{ij} = -p_{ij}\omega^2(h_0 - r(Q_{ij}/\omega)^n)$$

เมื่อ sng(X) = เครื่องหมายบอกทิศทางจะเท่ากับ 1 เมื่อ X>O นอกจากนี้ให้ใช้ค่า -1 (แต่ในกรณีที่เป็นเครื่องสูบน้ำ Q_{ij} จะเป็นบวกเสมอ)

หลังจากที่ค่า Head ค่าใหม่สามารถคำนวณออกมาได้แล้วโดยสมการ [A] [H]= [F] ค่าอัตราการไหลค่าใหม่ สามารถหาได้โดย

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j))$$

ถ้าผลรวมของค่าสมบูรณ์ของอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับค่าอัตราการไหลทั้งหมดในแต่ละเส้นท่อมีค่ามากกว่าค่าที่ยอมให้ (เช่น 0.0001) ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณสมการนี้กับสมการ [A] [H] = [F] อีกครั้ง และค่าอัตราการไหลรอบจุดใด ๆ ที่คำนวณในครั้งต่อไป และเมื่อคำนวณอัตราการไหลไม่เปลี่ยนแปลงมากหรือยอมรับผลการคำนวณ ก็จะได้คำตอบในระบบท่อที่ต้องการ

โปรแกรมจำลองระบบโครงข่ายท่อ ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของของเหลวในท่อภายใต้แรงดัน เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับสภาวะความเป็นจริง โดยวิเคราะห์จากตัวชี้วัดจากโปรแกรม เช่น อัตราการไหล ความเร็ว ทิศทางการไหลของน้ำ อิทธิพลแรงดันน้ำ ในพื้นที่ทำการศึกษา เป็นต้น

สืบเนื่องจากการพัฒนาด้านเทคโนโลยีสื่อสารและคอมพิวเตอร์ที่มีมาอย่างต่อเนื่องทำให้การพัฒนาโปรแกรมที่มีความยืดหยุ่นสูงในการนำไปประยุกต์ใช้และผ่านการตรวจสอบความถูกต้องพร้อมกับได้รับการยอมรับนั้นมีอยู่ไม่มากนักในส่วนนี้จึงกล่าวถึงโปรแกรมวิเคราะห์พฤติกรรมทางชลศาสตร์ และคุณภาพน้ำ ภายใต้สภาวะแรงดันในเส้นท่อ ที่ใช้ในการจำลองระบบโครงข่ายท่อประปาที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้ในระดับสากลได้แก่ โปรแกรม STONER, WaterGEMS และ EPANET

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบโครงข่ายท่อประปา [4] สามารถจำลองระบบโครงข่ายท่อประปาได้โดยไม่จำกัดขนาดของโครงข่าย ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบสูบจ่ายน้ำ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการทำนายประสิทธิภาพของระบบสูบจ่ายน้ำได้ในหลากหลายมิติ เช่น ด้านการบริหารจัดการน้ำอย่างเป็นระบบ การปรับปรุงระบบสูบจ่ายน้ำ และการรับมือกับสถานการณ์ฉุกเฉินต่าง ๆ ได้ โปรแกรม EPANET [5] เป็นโปรแกรม Open source ที่พัฒนาขึ้นโดย United States Environmental Protection Agency (US EPA) ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางชลศาสตร์ และคุณภาพน้ำ ภายใต้สภาวะแรงดันในเส้นท่อทุกช่วงเวลา

สำหรับการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายท่อประปานั้น [6] เป็นการวิเคราะห์การไหล และการสูญเสียพลังงานในระบบจ่ายน้ำ ภายใต้เงื่อนไขความต้องการในระบบ โดยประกอบไปด้วย ท่อ วาล์ว ปั๊ม และ อ่างเก็บน้ำ

ในงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตได้มีการใช้แบบจำลองระบบโครงข่ายท่อประปา ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ EPA-

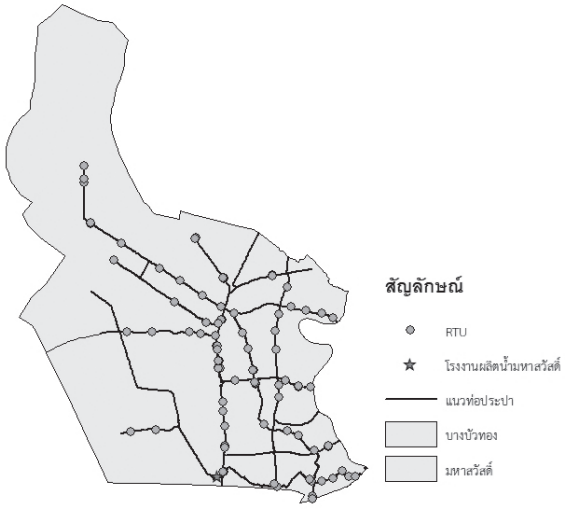
NET อยู่หลายบทความ ดังนี้ [7] การจำลองระบบ Cooling Water System (CWS) ของโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำ โดยทำการวิเคราะห์และประเมินระบบ CWS ภายใต้สภาวะปกติ และสภาวะวิกฤติ [8] การใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์หาปริมาณการเติมคลอรีนของระบบจ่ายน้ำในอุตสาหกรรมแปรรูปแร่ และหาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดื่มให้ระดับปริมาณคลอรีนอยู่ในเกณฑ์ 0.1-0.2 mg/L [9] การประยุกต์ใช้แบบจำลองระบบโครงข่ายท่อประธานของการประปานครหลวงสาขาพญาไท และใช้แบบจำลองในกรณีปิดซ่อมท่อประปา [10] การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของอาคารสูง 20 ชั้น พร้อมทั้งเสนอแนวทางในการลดอายุน้ำในถังพักน้ำ และเสนอแนวทางบริหารจัดการแรงดันด้วยการปรับการเดินเครื่องสูบน้ำอย่างเหมาะสม เพื่อช่วยประหยัดพลังงาน และยืดอายุการใช้งานวัสดุสุขภัณฑ์หรืออุปกรณ์ใช้น้ำ [11] ประยุกต์ใช้แบบจำลองกรณีศึกษา การบริหารจัดการคลอรีนอิสระคงเหลือ เพื่อให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ จุดตรวจวัดไกลที่สุดมีค่าเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานองค์การอนามัยโลก

การประปานครหลวงและภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ [12] ทำการศึกษาและวิจัยระบบโครงข่ายท่อประปาในพื้นที่ให้บริการน้ำประปาพื้นที่บริการสาขาสมุทรปราการ เพื่อการบริหารจัดการปริมาณและแรงดันน้ำอย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้ใช้เป็นต้นแบบ และแนวทางในการพัฒนาแบบจำลอง EPANET ของการประปานครหลวง

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การกำหนดขอบเขตพื้นที่และเลือกจุดเก็บค่าปริมาณน้ำและแรงดัน ได้เลือกพื้นที่ให้บริการน้ำประปา การประปานครหลวง สาขามหาสวัสดิ์ และสาขาบางบัวทอง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีแนวโน้มของการใช้น้ำสูง ประกอบด้วย จุดจ่ายน้ำ (Reservoir) 1 จุด จุดน้ำเข้าพื้นที่ (UA Inlet) 3 จุด จุดน้ำออกพื้นที่ (UA Outlet) 5 จุด ตู้เครื่องวัด (RTU) 101 ตู้ มิเตอร์น้ำหลัก 10 ตัว เส้นท่อ 1,200 เส้น วาล์ว 150 ตัว แสดงดังรูปที่ 2

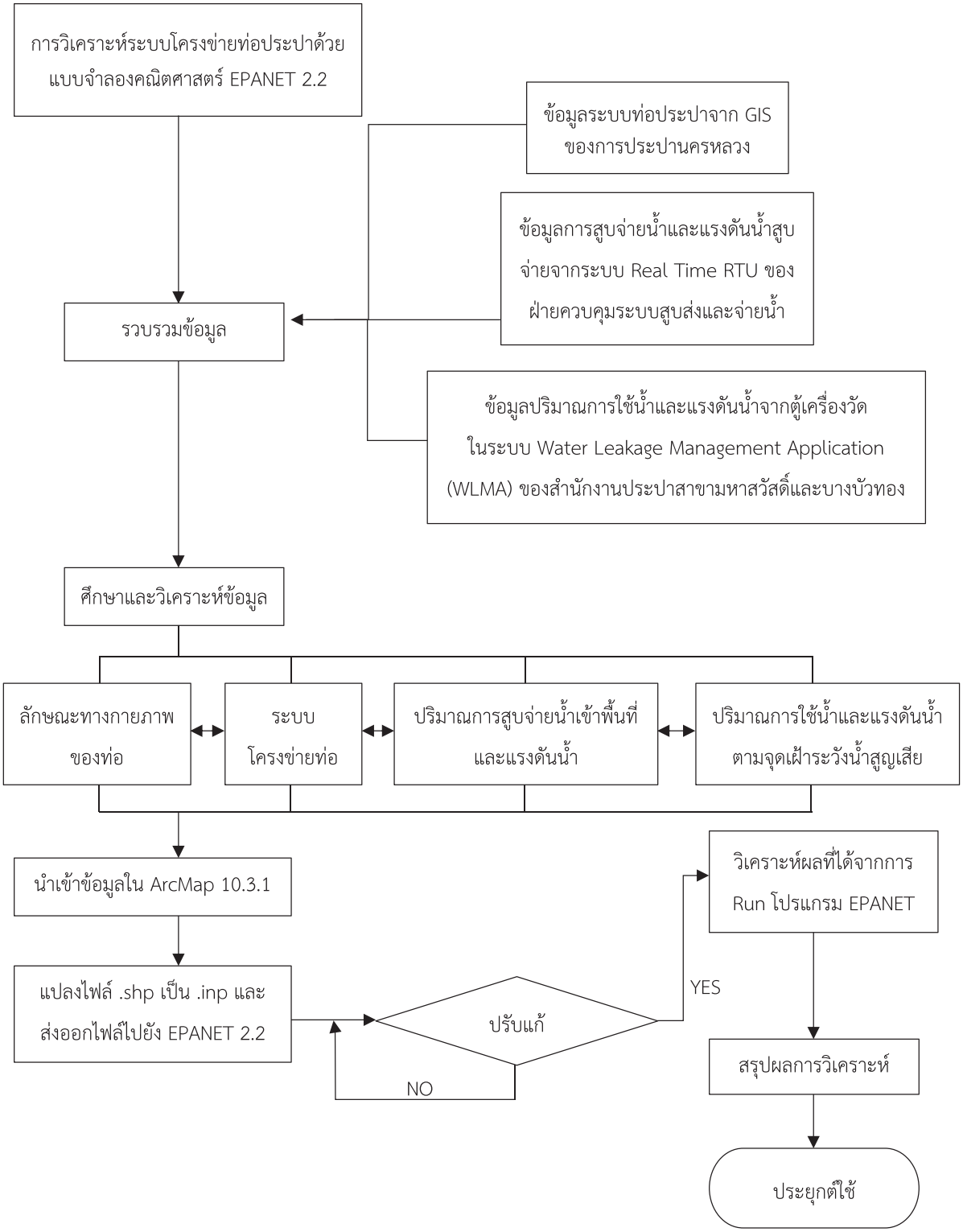
การนำเข้าข้อมูลลักษณะทางกายภาพของโครงข่ายประกอบด้วย ข้อมูลจุดจ่ายน้ำเข้าโครงข่าย ข้อมูลแนวท่อประปา ข้อมูลปริมาณการจ่ายน้ำและแรงดันน้ำ ณ โรงสูบจ่ายน้ำ ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำที่จุดเฝ้าระวังน้ำสูญเสีย ทั้งหมดนำเข้าโปรแกรม EPANET ผ่านการปรับแต่งข้อมูลโครงข่ายด้วยโปรแกรม ArcMap ร่วมกับ Shp2epa เพื่อแปลงไฟล์จาก .shp ไปเป็น ไฟล์ .inp ตามผังการดำเนินการสร้างแบบจำลองโครงข่ายท่อประปา ดังรูปที่ 3 และจะได้โครงข่าย ดังรูปที่ 4.1 และแสดงพร้อมระดับความดันน้ำ ดังรูปที่ 4.2



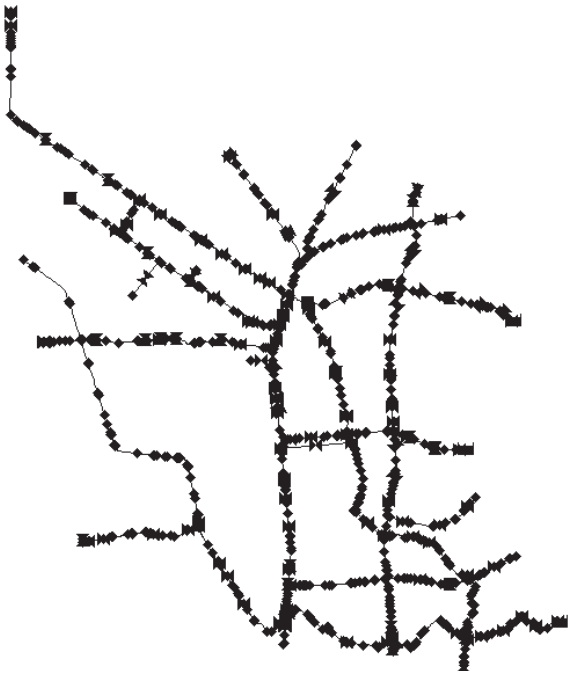
รูปที่ 2 จุดวัดปริมาณน้ำและแรงดันน้ำ จุดน้ำเข้าน้ำออกในพื้นที่สาขามหาสวัสดิ์ และบางบัวทอง

ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายท่อประปาใช้ข้อมูลรายชั่วโมงของ 1 วัน ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากช่วงวันที่ 1 ธันวาคม - 30 ธันวาคม พ.ศ. 2564 ในขั้นตอนปรับเทียบและปรับแก้แบบจำลองจะต้องทำการทดสอบแบบจำลองโดยวิธีการสุ่มค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้น้ำและแรงดันน้ำ ได้แก่ ค่า roughness ในเส้นท่อ ค่าสัมประสิทธิ์การรั่วไหลในระบบท่อ การปรับรูปแบบการทำงานของวาล์ว และการปรับแก้ค่าความต้องการใช้น้ำในแบบจำลอง การจำลองการรั่วไหลในท่อใช้การสุ่มค่า Emitter coefficient ในแบบจำลอง โดยการปรับเทียบกับค่าจริงของปริมาณน้ำที่ออกจากโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์

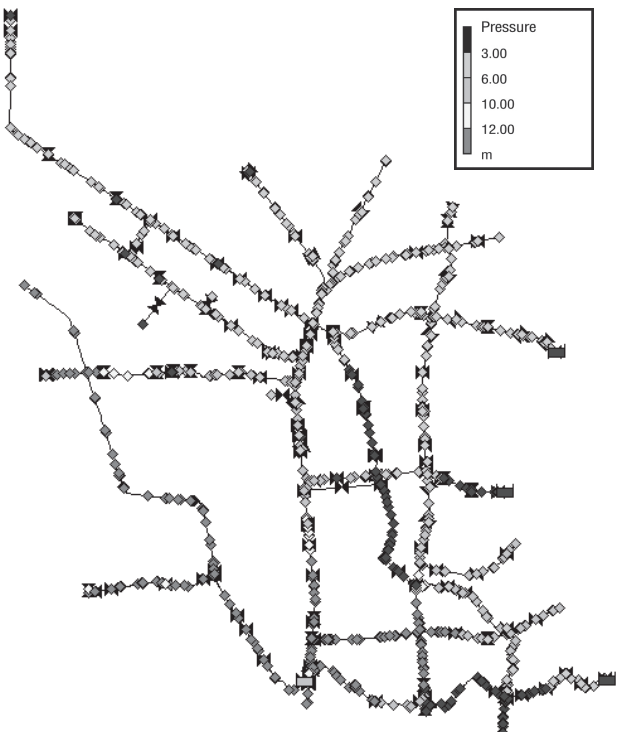
ส่วนข้อมูลที่นำมาปรับเทียบ ได้แก่ ปริมาณน้ำ แรงดันน้ำของจุดเฝ้าระวังน้ำสูญเสีย และมิเตอร์น้ำหลัก ในการประมวลผลแบบจำลองนั้นได้ปรับแก้จำนวน 26 รอบ ตามผังการดำเนินการสอบเทียบแบบจำลอง ดังรูปที่ 5



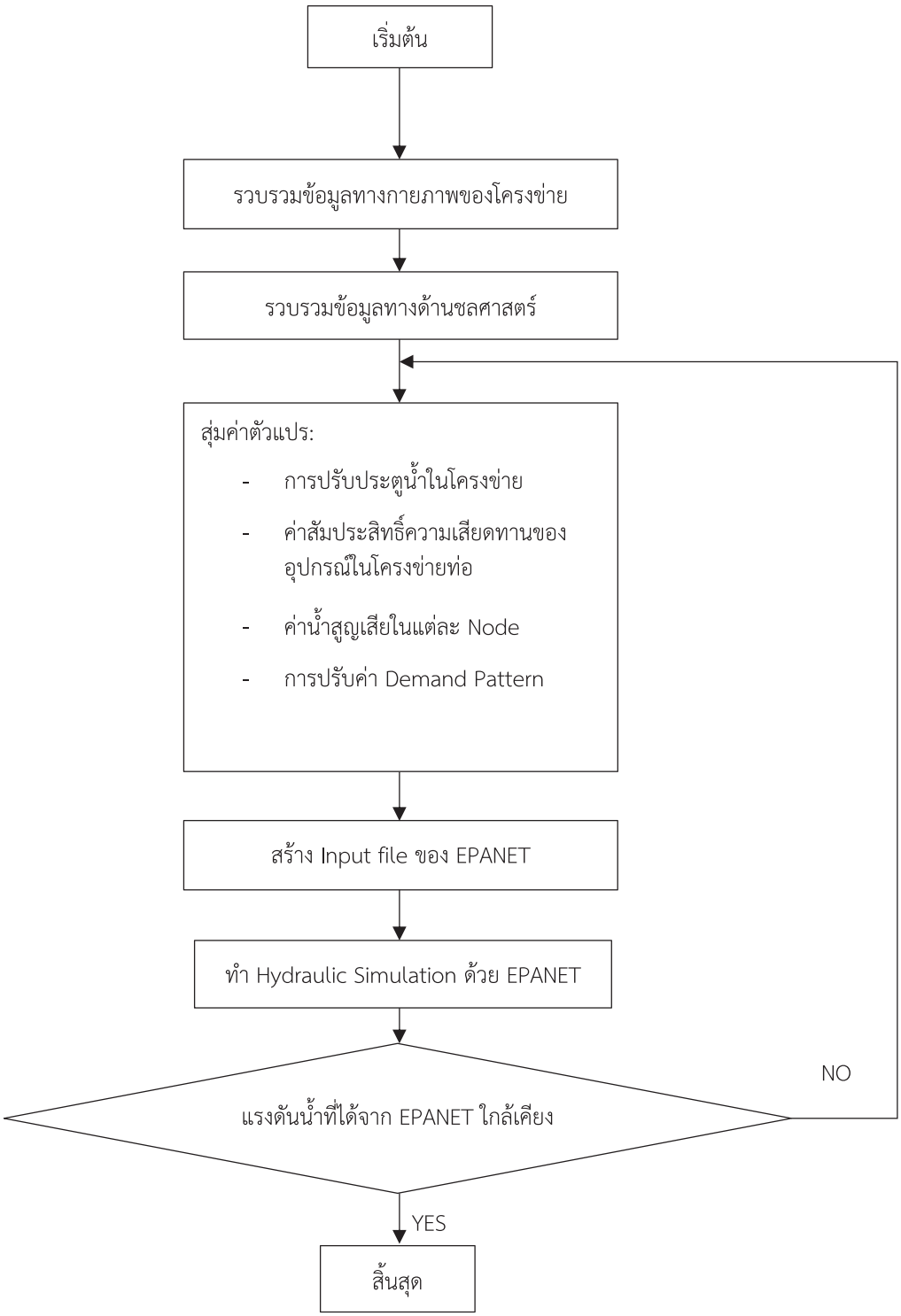
รูปที่ 3 ผังการดำเนินการสร้างแบบจำลองโครงข่ายท่อประปา



รูปที่ 4.1 โครงข่ายจากการสร้างแบบจำลองโครงข่ายท่อประปาในโปรแกรม EPANET



รูปที่ 4.2 โครงข่ายท่อประปาในโปรแกรม EPANET แสดงระดับความดันน้ำในท่อ



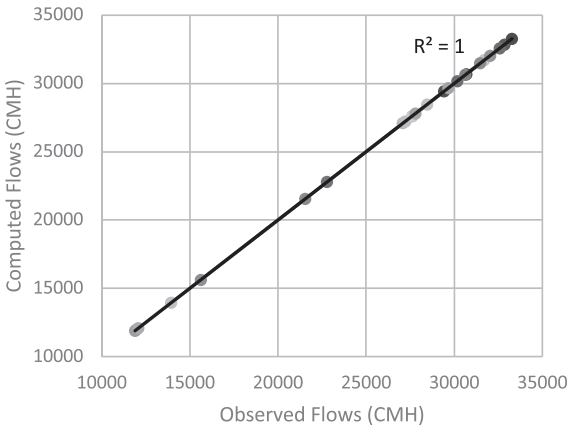
รูปที่ 5 ผังการสอบเทียบแบบจำลอง

5. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล

ผลจากการทดสอบแบบจำลองที่ได้จากการปรับค่าตัวแปรทำให้ได้ค่าปริมาณน้ำ และแรงดันน้ำเมื่อปรับจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสนาม ผลของการปรับเทียบแสดงค่าดังตารางที่ 1 รูปที่ 6 และตารางที่ 2 รูปที่ 7

ตารางที่ 1 ผลการปรับเทียบปริมาณน้ำ

สถานที่	จำนวนชั่วโมง	ค่าจริง (CMH)	แบบจำลอง (CMH)	Mean Error	RMSE
โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์	24	25,837.348	25,837.353	3.317	3.829



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำในสนามกับแบบจำลอง

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 6 พบว่าผลการสอบเทียบปริมาณน้ำที่ออกจากโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ ของแบบจำลองโครงข่ายท่อประปา จากการ Trial Error ได้ค่าสัมประสิทธิ์การรั่วภายในท่อ (Emitter Coefficient) ของทั้งโครงข่ายเท่ากับ 2.249821 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของท่อ (Roughness) เท่ากับ 130 และการปรับแก้รูปแบบค่าความต้องการใช้น้ำ (Demand Pattern) ของจุดเครื่องวัดพื้นที่เฝ้าระวังน้ำสูญเสีย การปรับเทียบแบบจำลองจะได้ค่าอัตราการไหลเฉลี่ยของแบบจำลอง 25,837.353 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อเทียบกับค่าในสนาม 25,837.348 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน 0.00002 เมื่อคิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด เท่ากับ 3.317 ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง เท่ากับ 3.829 และค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น เท่ากับ 1.00

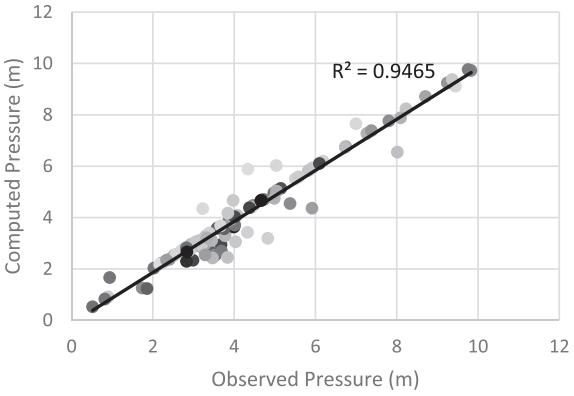
จากตารางที่ 2 และรูปที่ 7 พบว่าผลการสอบเทียบแรงดันน้ำตามจุดเครื่องวัด พื้นที่เฝ้าระวังน้ำสูญเสียทั้ง 101 จุด และจุดเครื่องวัดมิเตอร์หลักท่อประธานทั้ง 10 จุด จากการปรับ TCV (Throttle Control Valve) ในท่อประธานและการปรับ PRV (Pressure Reducing Valve) บริเวณจุดเครื่องวัดพื้นที่เฝ้าระวังน้ำสูญเสีย ได้ค่าความแตกต่างของแรงดันเฉลี่ย เป็น 0.15 เมตร ร้อยละของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.04 คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบค่าเฉลี่ยความผิดพลาด เท่ากับ 0.289 ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง เท่ากับ 0.653 และค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น เท่ากับ 0.946

6. สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

จากการสร้างแบบจำลองโครงข่ายท่อประปาในพื้นที่ให้บริการน้ำประปา ของการประปานครหลวง สาขามหาสวัสดิ์และบางบัวทอง ด้วยโปรแกรม EPANET มีขั้นตอนการศึกษา คือ การจัดเก็บข้อมูล การจัดเตรียมข้อมูลสำหรับนำเข้าแบบจำลอง การสร้างแบบจำลอง การปรับแก้และปรับเทียบแบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง EPANET สามารถจำลองระบบโครงข่ายท่อประปาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเห็นได้จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าในสนามกับแบบจำลอง พบว่าได้ผลของค่าความคลาดเคลื่อนปริมาณน้ำเฉลี่ยร้อยละ 0.00002 และผลการปรับเทียบค่าความแตกต่างของแรงดันน้ำเฉลี่ยได้ร้อยละ 3.04 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการปรับแก้ค่าในแบบจำลอง ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การรั่วไหลของท่อเท่ากับ 2.249821 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของท่อเท่ากับ 130 พร้อมด้วยการปรับแก้รูปแบบค่าความต้องการใช้น้ำในแต่ละ DMA และการปรับแก้ค่าการตั้งค่าของวาล์วบางตัว ทำให้แบบจำลองโครงข่ายท่อประปาที่สร้างขึ้นนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทดสอบกับสถานการณ์ต่าง ๆ ได้ต่อไป เช่น การนำไปใช้หาแนวทางการปรับปรุงระบบโครงข่ายท่อประปาเพื่อรองรับความต้องการใช้น้ำในพื้นที่ที่มีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้น

และการนำไปใช้เพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรมทางชลศาสตร์ เพื่อเสนอวิธีการแก้ไขเมื่อเกิดสถานการณ์ท่อประปาแตกรั่ว เป็นต้น

ในส่วนของข้อจำกัดและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อการปรับปรุงแบบจำลอง เนื่องจากปัจจุบันการประปานครหลวงไม่มีอุปกรณ์บันทึกค่าระดับของท่อประปาและไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถบันทึกรูปแบบการตั้งค่าการทำงานของวาล์วได้ ในการศึกษานี้จึงกำหนดให้ค่าระดับท่ออยู่ในระดับเดียวกัน ซึ่งในการจำลองได้กำหนดค่าระดับท่อเป็น 0.0 เมตรเท่ากันทั้งหมด และจึงใช้การปรับแก้ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้แบบจำลองได้ค่าแรงดันน้ำและปริมาณน้ำในระบบมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริง แต่หากว่าในอนาคตมีข้อมูลระดับแนวท่อและรูปแบบการตั้งค่าวาล์วเพิ่มเติม จะทำให้แบบจำลองสามารถประมาณการได้สมจริงขึ้น ดังนั้นหากการประปานครหลวงมีการปรับปรุงกระบวนการจัดเก็บข้อมูลของอุปกรณ์ให้สามารถบันทึกค่าเหล่านี้ได้ จะทำให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองให้ดียิ่งขึ้นต่อไป



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบปริมาณแรงดันในสนามกับแบบจำลอง

ตารางที่ 2 ผลการปรับเทียบปริมาณแรงดันน้ำเฉลี่ย

จุดเครื่องวัด	แรงดันน้ำเฉลี่ย(m)					แรงดันน้ำต่ำสุด(m)		แรงดันน้ำสูงสุด(m)	
	ค่าจริง	แบบจำลอง	ความแตกต่าง	Mean Error	RMSE	ค่าจริง	แบบจำลอง	ค่าจริง	แบบจำลอง
P050	0.94	1.66	-0.72	0.716	0.790	0.28	0.74	3.62	4.70
UZ5408	3.23	4.34	-1.11	1.113	1.382	0.57	3.14	5.65	7.58
UZ5413	3.98	4.66	-0.68	0.707	1.067	1.16	3.04	6.41	8.01
UZ5412	5.04	6.02	-0.98	0.983	1.144	1.85	3.61	7.52	9.75
UZ5411	4.34	5.88	-1.54	1.543	1.710	0.93	3.54	6.77	9.61
U017	13.85	14.17	-0.32	0.749	0.991	4.07	5.66	19.40	18.83
UZ5415	17.00	17.65	-0.65	0.829	0.929	6.74	6.15	23.12	24.27
UZ5601	18.10	17.88	0.22	0.529	0.619	6.33	6.34	25.14	24.55
UZ5410	3.29	2.54	0.75	1.085	1.122	0.11	0.95	5.69	6.12
UZ5407	4.99	4.74	0.25	0.834	0.877	1.32	2.37	7.76	8.39
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	-	-	-	-
ค่าเฉลี่ย	4.93	4.78	0.15	0.289	0.653	2.34	3.55	11.11	12.18

7. เอกสารอ้างอิง

1. Metropolitan Waterworks Authority, 2022, Power BI Water Distribution Data 2017-2022 [Online], Available: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjRlODkzNmUtYTBhYi 00ZjY2LTgz MzAtMDAwMDQzNjRjOTg5IiwidCI6IjhlYzMzMGU1LTFjMDUtNGQ1Yi05Nzg2LWM1Nzk4MjFjNmM3NCIsImMiOjEwfQ%3D%3D&pageName=ReportSection [22 July 2022] (In Thai)

2. Metropolitan Waterworks Authority, 2022, Water Distribution Pumping Station Annual Report, 2017–2022 [Online], Available: https://extranet.mwa.co.th:11001/fkj/index.php/daily-water-report. [22 July 2022] (In Thai)

3. Todini, E. and Fiiati, S., 1987, "A Gradient Method for the Analysis of Pipe Network," *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*, Leicester Polytechnic, UK.

4. Govindan, V.S. and Simonsen, A., 2017, Computer Modeling of Water Distribution System, 4th ed., American Water Works Association, Washington DC, 312 p.

5. Rossman, L.A., 2000, EPANET 2 User's Manual, US Environmental Protection Agency, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati.

6. Simon, A.L., 1989, Hydraulics, 3rd ed., Prentice Hall, New York, 494 p.

7. Bucur, M.D., Cosoiu, I.C., Iovanel G.R., Nicolae, A.A. and Georgescu, C.S., 2017, "Assessing the Operation of the Cooling Water System of a Hydro Power Plant Using EPANET," *Energy Procedia*, 112, pp. 51-57.

8. Susanto, A., Amrina, U., Purwanto, P., Putro, K.E., Tochu, E.W. and Wilmot, C.J., 2020, "Analysts of Free Residual Chlorine in Drinking Water Distribution Systems in Ore Processing Industry,"*Polish Journal of Environmental Studies*, 29 (6), pp. 43321-4330. https://doi.org/10.15244/pjones/120154.

9. Wongthum, C., 2017, Study on EPANET Model Application for Main Pipe Network in Phaya Thai Branch Office of Metropolitan Waterworks Authority, Master of Engineering Thesis, Water Resource Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 114 p.

10. Sairuamyat, A., 2019, Analysis of High Rise Building Pipeline System using EPANET, Master of Engineering Thesis, Water Resource Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 140 p.

11. Keawsang, S., 2014, Water Quality Simulation of a Water Distribution Network System by EPANET, Master of Engineering Thesis, Water Resource Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 90 p.

12. Metropolitan Waterworks Authority and Department of Water Resources Engineering Kasetsart University, 2020, Research and Development EPANET Model for Improving the Efficiency of Water Distribution Managing, 44 p.