

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการประเมินพลังงานในโครงข่ายท่อน้ำประปา SOFTWARE DEVELOPMENT FOR ENERGY ASSESSMENTS IN WATER NETWORKS

ณัฏพล จารุวิมลกุล¹, ชัยพร เจริญฉิม¹, จิรเมธ ช่างคล่อม^{2*}, สุรชัย ลิปิวัฒนาการ³ และ อติชัย พรพรหมินทร์³

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*Corresponding author address: jiramate.ch@ku.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน การประเมินพลังงานมีความสำคัญต่อการบริหารจัดการระบบโครงข่ายท่อน้ำประปา เนื่องจากเป็นระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานขนาดใหญ่ที่ใช้พลังงานอย่างมากเพื่อสามารถจ่ายน้ำที่มีปริมาณและแรงดันเพียงพอไปยังผู้ใช้น้ำ การประเมินพลังงานในโครงข่ายท่อน้ำประปาทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของระบบที่มีอยู่ได้ โดยการประเมินพลังงานจำเป็นต้องทำสมดุลของพลังงาน โดยเบื้องต้น พลังงานเข้าระบบ (E_m) จะถูกเปลี่ยนอยู่ในรูปพลังงาน 3 องค์ประกอบดังนี้ 1) พลังงานที่ส่งถึงผู้ใช้น้ำ (E_U) 2) พลังงานที่ออกจากระบบในรูปแบบน้ำสูญเสีย (E_l) และ 3) พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (E_f) การทราบถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของแต่ละองค์ประกอบและทำให้สามารถวางแผนจัดการและเลือกกลยุทธ์ที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพได้ เช่น การลดน้ำสูญเสียเพื่อลด E_l การปรับปรุงขยายขนาดท่อเพื่อลด E_f เป็นต้น ปัจจุบันการทำสมดุลพลังงานได้อย่างละเอียดนั้นจำเป็นต้องดึงผลลัพธ์จากแบบจำลองชลศาสตร์ด้วยมือซึ่งทำให้ต้องใช้ระยะเวลาและความละเอียดในการคำนวณอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาซอฟต์แวร์ที่สามารถประเมินพลังงานโดยนำเข้าแบบจำลอง EPANET เพื่อความสะดวกในการทำสมดุลพลังงาน โดยได้ทดสอบการใช้งานกับโครงข่ายท่อน้ำประปาในพื้นที่ฝักระวังของสำนักงานการประปานครหลวงสาขาสุมทพรปราการ 2 พื้นที่ฝักระวัง พบว่าในพื้นที่ฝักระวังที่ 1 (DMA : 1) มี E_U เท่ากับ 79.44% ของ E_m และพื้นที่ฝักระวังที่ 2 (DMA : 2) มี E_U เท่ากับ 56.68% ของ E_m กล่าวคือ DMA : 2 ควรได้รับการปรับปรุงก่อน DMA : 1 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของซอฟต์แวร์อย่างชัดเจนในด้านการจัดการ

คำสำคัญ: โครงข่ายท่อประปา, การประเมินพลังงาน, สมดุลพลังงาน

Abstract

Energy assessment is one of the most important evaluations in water supply networks management. A water supply network is typically a large infrastructure that consumes a lot of energy to supply water with sufficient volume and pressure to users. An energy assessment in a water supply network aims to, therefore, determine the efficiency of the current system. Energy assessment follows the conservation of energy principle, which then requires to calculate energy balance. Initially, the energy into the system (E_m) is transformed into three energy elements: 1) the energy delivered to water users (E_U), 2) the energy exiting the system in a water loss form (E_l), and 3) the energy lost due to friction (E_f). Knowing the energy efficiency of each component facilitate plan making, management and decision making on appropriate strategies to increase efficiency, such as reducing water loss to reduce E_l , extension of pipe size to reduce E_f , etc. Traditionally, to calculate an energy balance, one has to extract results from the hydraulic model, which requires considerable resources. This research has developed a software that can assess energy by importing the hydraulics model of a water supply network from the EPANET program to facilitate energy balancing. The software has been validated using a 2 water supply network model in district metered area (DMA), the Office of the Metropolitan Waterworks Authority, Samut Prakan Branch. According to data of March 2018, the energy assessment shows that E_U equals to 79.44% of E_m in DMA: 1 while E_U equals to 56.8% of E_m in DMA: 2. The result indicates that DMA: 1 is more energy efficient than DMA: 2, therefore, DMA: 2 should be improved first. This result shows a clear benefit of the developed software.

Keywords: Water supply network, Energy assessment, Energy balance

1. บทนำ

โครงข่ายท่อน้ำประปาเป็นระบบสาธารณูปโภคที่มีขนาดใหญ่จึงอาจนับได้ว่าเป็นความท้าทายในการจัดการให้มีประสิทธิภาพอย่างเหมาะสม และเป็นการจัดการที่ต้องใช้พลังงานอย่างมากที่จะจ่ายน้ำที่มีปริมาณและแรงดันที่เพียงพอไปยังผู้ใช้น้ำ [1] โดยหนึ่งในแนวทางการจัดการที่มีประสิทธิภาพในสมัยใหม่ที่นานาชาติให้ความสนใจนั้นคือ การประเมินพลังงานในโครงข่ายท่อน้ำประปา

การประเมินพลังงานนั้นคือการวิเคราะห์ถึงพลังงานในทุกองค์ประกอบโดยจำเป็นที่ต้องทำสมดุลของพลังงาน ซึ่งจะไม่ใช้แค่เพียงทำให้ทราบว่ามี การสูญเสียพลังงานไปเท่าไร แต่จะทำให้ทราบว่าพลังงานที่เข้าสู่ระบบได้ถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานรูปแบบใดบ้าง ซึ่งจะทำให้สามารถวางแผนจัดการโครงข่ายท่อน้ำประปาได้ เช่น แผนลำดับการซ่อมบำรุงเส้นท่อเพื่อลดการรั่วของน้ำประปา, การปรับปรุงขนาดเส้นท่อใหม่เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในระบบ เป็นต้น

ปัจจุบัน การจัดการโครงข่ายท่อน้ำประปาทั่วโลกนิยมกระทำบนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายท่อน้ำประปาทั้งนี้เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการวิเคราะห์ระบบ โดยแบบจำลองนั้นต้องได้รับการสอบเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลองเสียก่อนที่จะใช้งาน ดังนั้นการทำให้สมดุลพลังงานได้อย่างละเอียดนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดึงผลลัพธ์จากแบบจำลองชลศาสตร์มาทำการคำนวณ แต่ในปัจจุบันการดึงผลลัพธ์จากแบบจำลองชลศาสตร์ยังต้องทำด้วยมือซึ่งทำให้ต้องใช้ระยะเวลาและความละเอียดในการคำนวณอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาซอฟต์แวร์ที่สามารถประเมินพลังงานโดยนำเข้าแบบจำลอง EPANET ที่มีชื่อเรียกว่า KU2EPA เพื่อความสะดวกในการทำสมดุลพลังงาน โดยได้ทดลองใช้งานกับโครงข่ายท่อน้ำประปาในพื้นที่เฝ้าระวังของสำนักงานการประปานครหลวงสาขาสุมทราการ 2 พื้นที่เฝ้าระวัง

2. นิยาม

2.1. แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา

แบบจำลองคณิตศาสตร์โครงข่ายท่อ เป็นที่นิยมในการจัดการนโยบายเกี่ยวกับระบบโครงข่ายท่อประปาอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศต่างประเท โดยหนึ่งโปรแกรมที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการออกแบบ จัดทำแบบจำลองโครงข่ายท่อคือ โปรแกรม EPANET ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาโดยหน่วยงาน Environmental Protection Agency (EPA) ประเทศสหรัฐอเมริกา เนื่องจากสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำและไม่มีค่าลิขสิทธิ์

โดยการที่จะประเมินพลังงานได้อย่างถูกต้อง แบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปาจำเป็นต้องได้รับการสอบเทียบพารามิเตอร์ด้านชลศาสตร์ของแบบจำลองเสียก่อนที่จะใช้เป็นตัวแทนโครงข่ายท่อน้ำประปาจริง ในงานวิจัยฉบับนี้ได้แบ่งการสอบเทียบ

พารามิเตอร์แบบจำลองชลศาสตร์เป็น 2 ชนิด ได้แก่ 1.) เปรียบเทียบอัตราการไหลจากการตรวจวัดกับแบบจำลอง , 2.) เปรียบเทียบแรงดันจากการตรวจวัดกับแบบจำลอง ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้พารามิเตอร์ด้านชลศาสตร์ของแบบจำลองดังต่อไปนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์จำลองการรั่ว (Emitter Coefficient : C)
- ค่ารูปแบบการใช้น้ำ (Demand Patterns : d(t))
- ค่าระดับจุดตรวจวัดแรงดัน (Elevations : z)
- ค่าความขรุขระผนังท่อ (Roughness : r)

การสอบเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลองในงานวิจัยฉบับนี้จะกระทำโดยกระบวนการ Optimization ซึ่งได้พัฒนาชุดคำสั่งเพื่อทำการสอบเทียบพารามิเตอร์ด้านชลศาสตร์ของแบบจำลองโดยอัตโนมัติบนภาษา Python ด้วยแพ็คเกจที่มีชื่อว่า SciPy ซึ่งมีส่วนต่อขยายในการ Optimization โดยเลือกใช้กระบวนการ Brent's minimize method [2] เนื่องจาก

- สร้างขอบเขตของค่าที่เป็นไปได้ของพารามิเตอร์ได้
- ไม่ต้องการฟังก์ชันอนุพันธ์ในการ Optimize

โดยจะใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นผลรวมของผลต่างยกกำลังสอง (Sum of Squared estimate of Errors : SSE) ดังต่อไปนี้

Objective function:

$$\underset{C, d(t)}{\text{Min}} \quad \sum (Q_c^{\text{in}} - Q_m^{\text{in}})^2 \quad (1)$$

$$\underset{z, r}{\text{Min}} \quad \sum (P_{n,c} - P_{n,m})^2 \quad (2)$$

Subject to:

$$g(C, d(t), z, r) = 0 \quad (3)$$

$$0 \leq C \leq 1 \quad (4)$$

$$d(t)_j \geq 0 \quad (5)$$

$$100 \leq r_l \leq 140 \quad (6)$$

เมื่อ

$g(C, d(t), z, r)$ คือ แบบจำลองชลศาสตร์ EPANET ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรตัดสินใจ

$Q_c^{\text{in}}, Q_m^{\text{in}}$ คือ อัตราการไหลเข้าพื้นที่จากแบบจำลองและการตรวจวัด (ลบ.ม./ชม.)

$P_{n,c}, P_{n,m}$ คือ แรงดัน ณ จุดตรวจวัดที่ n จากแบบจำลองและการตรวจวัด (ม.)

$d(t)_j$ คือ รูปแบบการใช้น้ำ เมื่อเวลา t ณ จุดผู้ใช้น้ำที่ j

z_n คือ ค่าระดับของจุดตรวจวัดแรงดันที่ n (ม.)

r_l คือ ค่าความขรุขระของผนังท่อ (Hazen-Williams) ของท่อที่ l

2.2. สมดุลพลังงาน

แนวคิดของสมดุลพลังงาน [3] คือ พลังงานเข้าสู่ระบบ (E_{in}) จะ

เท่ากับผลรวมของพลังงานออกจากระบบ (E_{out}) กับ พลังงานที่
สลายไป ($E_{dissipated}$) ซึ่งเบื้องต้น E_{out} จะแบ่งออกเป็นพลังงาน 2
องค์ประกอบ ได้แก่ 1.) พลังงานที่ส่งถึงผู้ใช้น้ำ (E_U), 2.) พลังงานที่
ออกจากระบบในรูปแบบน้ำสูญเสีย (E_I) และ $E_{dissipated}$ จะหมายถึง
พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (E_F) โดยสามารถสรุปได้ดัง
ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของพลังงานตามแนวคิดสมดุลพลังงาน

| | | |
|-------------------------------------|--|---|
| พลังงาน เข้าระบบ (E_{in}) | พลังงานออก จากระบบ (E_{out}) | พลังงานที่ส่งถึงผู้ใช้น้ำ (E_U) |
| | | พลังงานที่ออกจากระบบใน รูปแบบน้ำสูญเสีย (E_I) |
| | พลังงานที่ สลายไป ($E_{dissipated}$) | พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากแรง เสียดทาน (E_F) |

ซึ่งสามารถคำนวณพลังงานในแต่ละองค์ประกอบได้ดังต่อไปนี้

- พลังงานเข้าระบบ

$$E_{in}(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} [\sum_{i=1}^{n_{in}} Q_{in,i}(t_k) \cdot H_i(t_k)] \cdot \Delta t_k \quad (7)$$

เมื่อ

$$\gamma = \text{น้ำหนักจำเพาะของน้ำ (นิวตัน/ลบ.ม.)}$$

$$Q_{in,i}(t_k) = \text{อัตราการไหลทางเข้าที่ } i \text{ ที่เวลา } t_k \text{ (ลบ.ม.)}$$

$$H_i(t_k) = \text{เฮดการไหลทางเข้าที่ } i \text{ ที่เวลา } t_k \text{ (ม.)}$$

- พลังงานที่ส่งถึงผู้ใช้น้ำ

$$E_U(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} [\sum_{i=1}^{n_{in}} Q_{D,i}(t_k) \cdot H_i(t_k)] \cdot \Delta t_k \quad (8)$$

เมื่อ

$$Q_{D,i}(t_k) = \text{อัตราการไหลจุดผู้ใช้น้ำ } i \text{ ที่เวลา } t_k \text{ (ลบ.ม.)}$$

$$H_i(t_k) = \text{เฮดการไหลจุดผู้ใช้น้ำที่ } i \text{ ที่เวลา } t_k \text{ (ม.)}$$

- พลังงานที่ออกจากระบบในรูปแบบน้ำสูญเสีย

$$E_I(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} [\sum_{i=1}^{n_{in}} q_i(t_k) \cdot H_i(t_k)] \cdot \Delta t_k \quad (9)$$

เมื่อ

$$q_i(t_k) = \text{อัตราการไหลจุดรั่วที่ } i \text{ ที่เวลา } t_k \text{ (ลบ.ม.)}$$

$$H_i(t_k) = \text{เฮดการไหลจุดรั่วที่ } i \text{ ที่เวลา } t_k \text{ (ม.)}$$

- พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน

$$E_F(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} [\sum_{i=1}^{n_{in}} Q_{F,i}(t_k) \cdot \Delta h_i(t_k)] \cdot \Delta t_k \quad (10)$$

เมื่อ

$$Q_{F,i}(t_k) = \text{อัตราการไหลเส้นท่อที่ } i \text{ ที่เวลา } t_k \text{ (ลบ.ม.)}$$

$\Delta h_i(t_k)$ = การสูญเสียเฮดการไหลท่อ i ที่เวลา t_k (ม.)
โดย t_p หมายถึง เวลาทั้งหมดของแบบจำลอง (Total Duration) ใน
งานวิจัยฉบับนี้ใช้ 24 ชั่วโมง และ Δt_k หมายถึง ช่วงเวลาของ
แบบจำลอง (Time Interval) ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้ 1 ชั่วโมง

การจำลองอัตราการไหลของจุดรั่ว (q_i) บนโครงข่ายท่อ
น้ำประปาในโปรแกรม EPANET จะทำการคำนวณจากความสัมพันธ์
ระหว่าง Emitter Coefficient (C), แรงดัน (P) และ Emitter
Exponent (N_1) ดังสมการต่อไปนี้

$$q_i = CP_i^{N_1} \quad (11)$$

3. คำอธิบายซอฟต์แวร์

3.1. แพคเกจสำหรับซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์สำหรับการประเมินพลังงานในงานวิจัยฉบับนี้ได้
พัฒนาบนภาษา Python เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่ไม่เสียค่าลิขสิทธิ์
และเป็นภาษาที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน บนภาษา Python
จะมีเครื่องมือเสริมซึ่งเรียกว่าแพคเกจ โดยหนึ่งในแพคเกจที่สามารถ
วิเคราะห์โครงข่ายท่อน้ำประปาได้และในงานวิจัยนี้เลือกใช้มีชื่อว่า
Water Network Tool for Resilience (WNTR) หรือเรียกอีกอย่าง
ว่า Winter ได้รับการพัฒนาจากหน่วยงาน EPA ซึ่งเป็นหน่วยงาน
เดียวกับผู้พัฒนาโปรแกรม EPANET โดย WNTR มีพื้นฐานในการ
ทำงานแบบเดียวกับโปรแกรม EPANET ทั้งหมด ซึ่งก่อนเริ่มต้นใช้
งานจำเป็นต้องมีไฟล์นามสกุล .INP ที่ได้จากโปรแกรม EPANET
version 2.0 เป็นไฟล์ตั้งต้นเสมอและภายในไฟล์ตั้งต้นนั้นต้องใช้
ภาษาอังกฤษทั้งหมด เนื่องจากแพคเกจ WNTR รองรับเฉพาะ
ภาษาอังกฤษเท่านั้น โดยแพคเกจ WNTR [5] มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1.) เพื่อจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา
- 2.) วิเคราะห์ความยืดหยุ่นของโครงข่ายท่อน้ำประปา
- 3.) เพื่อเพิ่มศักยภาพการทำงานของโปรแกรม EPANET โดย
สามารถทำงานร่วมกับแพคเกจอื่นบนภาษา Python ได้

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แบบจำลองของ WNTR จะถูกจัดเก็บอยู่ใน
หน่วย International System (SI) ทั้งหมด โดยข้อแนะนำของ
ผู้พัฒนาคือไฟล์ .INP ตั้งต้นควรระบุให้อยู่ในหน่วย SI ก่อนใช้
แบบจำลอง WNTR

3.2. ข้อกำหนดของซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์ KU2EPA มีความสามารถในการคำนวณสมดุล
พลังงานในรายชั่วโมง โดยจะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของ
พลังงานในแต่ละองค์ประกอบ โดยมีข้อกำหนดของซอฟต์แวร์
ดังต่อไปนี้

- 1.) ระบบปฏิบัติการที่สามารถใช้ได้คือ Windows10 ทุกรุ่น
- 2.) หน่วยความจำหลักความจุไม่ต่ำกว่า 4 กิกะไบต์

3.) พื้นที่ความจำไม่น้อยกว่า 1.2 กิกะไบต์

3.3. ข้อมูลนำเข้า

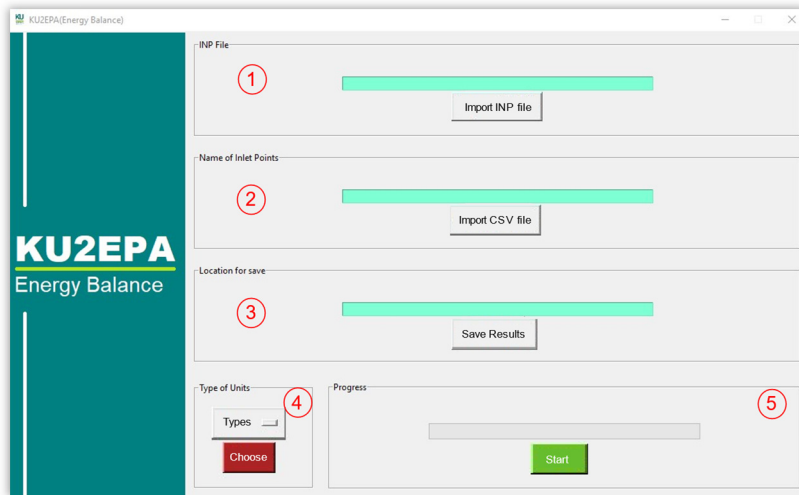
การใช้งานซอฟต์แวร์จำเป็นต้องมีการนำเข้าข้อมูลดังต่อไปนี้

- 1.) ไฟล์แบบจำลองชลศาสตร์ของโครงข่ายท่อน้ำประปาที่ได้รับการสอบเทียบพารามิเตอร์เรียบร้อยแล้ว ซึ่งเป็นไฟล์นามสกุล .INP จากโปรแกรม EPANET
- 2.) ไฟล์ชื่อจุดท่อน้ำเข้าของโครงข่ายท่อน้ำประปานินามสกุล .CSV โดยวิธีการกรอกด้วยการพิมพ์ชื่อจุดท่อน้ำเข้าต่อกันแล้วคั่นด้วยสัญลักษณ์คอมมา ดังต่อไปนี้

Name₁,Name₂,Name₃,...Name_n

- 3.) ตำแหน่งไฟล์สำหรับบันทึกผลลัพธ์สมมูลพลังงาน
- 4.) เลือกหน่วยของแบบจำลองโครงข่ายท่อน้ำประปา
- 5.) กดปุ่ม Start เพื่อเริ่มการคำนวณสมมูลพลังงาน

3.4. กราฟิกผู้ใช้งาน



รูปที่ 1 Graphic User Interface(GUI) ของซอฟต์แวร์ KU2EPA

ซอฟต์แวร์ในงานวิจัยฉบับนี้ได้สร้าง Graphic User Interface (GUI) เพื่ออำนวยความสะดวกและเข้าใจง่ายต่อการใช้งาน โดยมีลักษณะดังรูปที่ 1

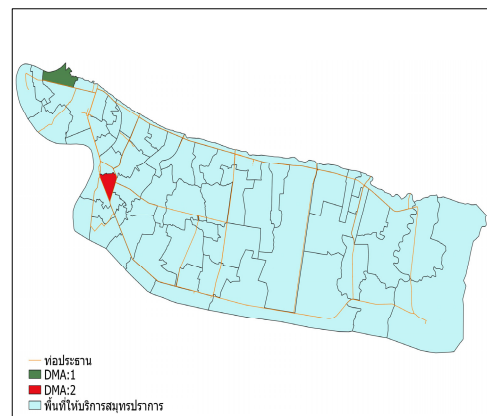
- โดย
- 1.) ออปชั่นสำหรับเลือกไฟล์ .INP
 - 2.) ออปชั่นสำหรับเลือกไฟล์ .CSV
 - 3.) ออปชั่นสำหรับเลือกตำแหน่งไฟล์สำหรับบันทึกผลลัพธ์สมมูลพลังงาน
 - 4.) ออปชั่นสำหรับเลือกหน่วยของแบบจำลอง
 - 5.) ออปชั่นสำหรับเริ่มการคำนวณ

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากซอฟต์แวร์ KU2EPA หน่วยของพลังงานจะอยู่ในรูปแบบของ กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kW-h) โดยไฟล์ของผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะอยู่ในชื่อไฟล์ Data of Energy เป็นไฟล์นามสกุล .CSV

4. พื้นที่ศึกษา

จังหวัดสมุทรปราการเป็นหนึ่งในพื้นที่ให้บริการของการประปา นครหลวง (กปน.) โดยจากข้อมูลในปี.ศ. 2561 พบว่ามีพื้นที่ให้บริการทั้งหมด 274.6 ตารางกิโลเมตรและผู้ใช้ น้ำประมาณ 195,872 ราย โดยทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็นพื้นที่เฝ้าระวัง (District Metered Area : DMA) จำนวน 70 พื้นที่ ภายใต้สถานะแรงดันเฉลี่ย ณ ทางเข้า DMA เฉลี่ยอยู่ที่ 6.2 เมตร เพื่อบริหารจัดการเรื่องของการสูญเสียภายในระบบ แต่เนื่องจากสภาพแรงดันที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การตรวจพบรอยรั่วนั้นทำได้ยาก เป็นผลให้การบริหารจัดการแบบ DMA ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดการแบบ DMA การประเมินพลังงานสามารถเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจเลือกแนวทางการปรับปรุงที่คุ้มค่าที่สุดได้ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอการประเมินพลังงานโดยยกตัวอย่างพื้นที่ศึกษาจำนวน 2 พื้นที่เฝ้าระวัง ในพื้นที่ กปน.

สาขาสมุทรปราการโดยมีตำแหน่งของพื้นที่ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 พื้นที่ศึกษาพื้นที่ให้บริการของสมุทรปราการ

โดยข้อมูลจากรายงานประจำปีของ กปน. ปี พ.ศ.2561 พื้นที่ศึกษา
มีลักษณะทางกายภาพ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ศึกษา

| DMA | จำนวน ผู้ใช้น้ำ (ราย) | จำนวน ทางน้ำ เข้า | ความยาว ท่อ (กิโลเมตร) | ร้อยละน้ำ สูญเสีย (เปอร์เซ็นต์) |
|-----|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 1,468 | 2 | 15.9 | 7.7 |
| 2 | 2,669 | 1 | 24.5 | 37.1 |

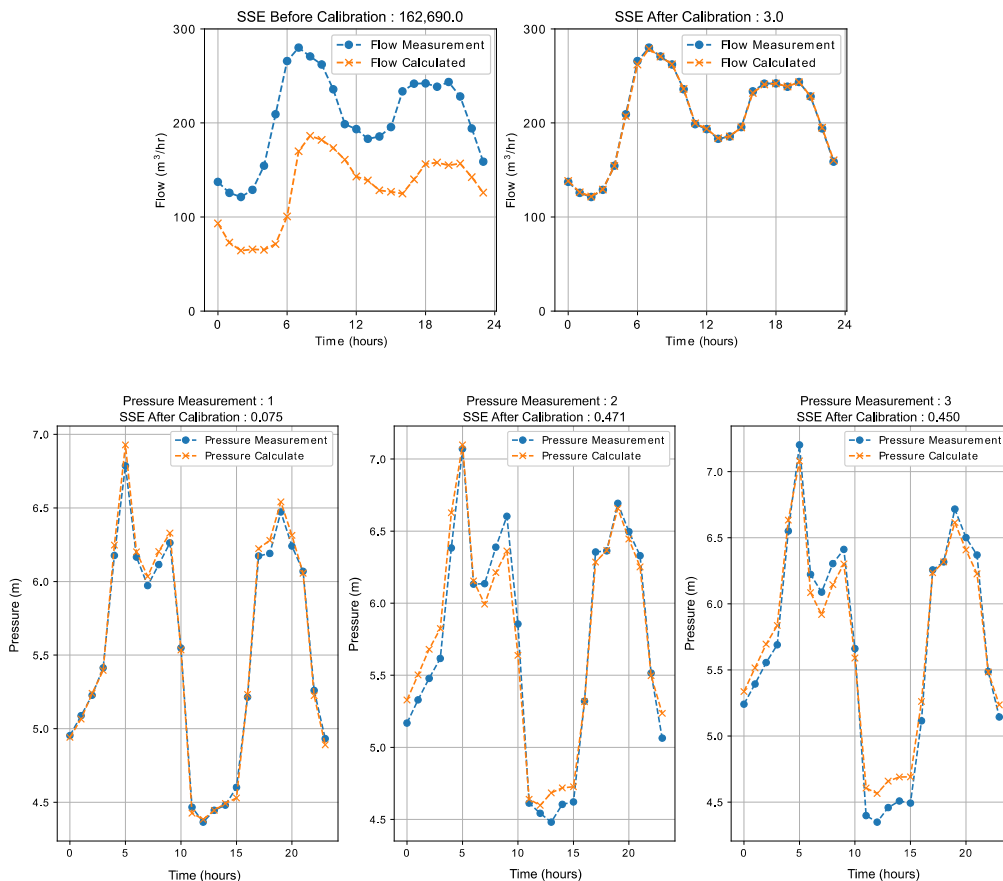
5. ผลการศึกษา

5.1. ผลการสอบเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

เมื่อทำการสอบเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลองชลศาสตร์
ทั้งหมดตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ผลลัพธ์ค่าความ
คลาดเคลื่อนของอัตราการไหลและแรงดัน ดังตารางที่ 3 และแสดง
กราฟตัวอย่างอัตราการไหลก่อนและหลังการสอบเทียบพารามิเตอร์
กับ แรงดันภายหลังการสอบเทียบพารามิเตอร์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่
ได้ของแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับค่าตรวจวัด จึงสามารถกล่าว
ได้ว่า แบบจำลองที่ได้รับการสอบเทียบจากวิธีข้างต้น สามารถใช้
เป็นตัวแทนโครงข่ายท่อประปาจริงได้

ตารางที่ 3 แสดงค่า SSE และ RMSE ก่อนและหลังทำการสอบเทียบแบบจำลอง

| DMA | ค่าความคลาด เคลื่อน | อัตราการไหล | | ค่า ความคลาด เคลื่อน | แรงดัน | | | | | |
|-----|--------------------------------------|-------------|------|----------------------------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|
| | | ก่อน | หลัง | | จุดวัดที่ 1 | | จุดวัดที่ 2 | | จุดวัดที่ 3 | |
| | | | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| 1 | SSE (m ³ /h) ² | 150,781 | 4 | SSE (m ²) | 53.12 | 3.01 | 56.23 | 0.41 | 71.54 | 0.26 |
| | RMSE (m ³ /h) | 79.26 | 0.41 | RMSE (m) | 1.49 | 0.35 | 1.53 | 0.13 | 1.73 | 0.1 |
| 2 | SSE (m ³ /h) ² | 162,690 | 3 | SSE (m ²) | 18.63 | 0.08 | 6.57 | 0.47 | 6.25 | 0.45 |
| | RMSE (m ³ /h) | 82.33 | 0.35 | RMSE (m) | 0.88 | 0.06 | 0.52 | 0.14 | 0.51 | 0.14 |



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลและแรงดันภายหลังการสอบเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

5.2. ผลของพลังงาน

ผลลัพธ์ของพลังงานในแต่ละองค์ประกอบที่ได้จากซอฟต์แวร์ KU2EPA จะมีรายละเอียดทุกชั่วโมงยกตัวอย่าง ดังตารางที่ 4 ซึ่งจะช่วยทำให้สามารถเห็นประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบโครงข่ายท่อน้ำประปาได้ดียิ่งขึ้น โดยจากผลลัพธ์การศึกษาพบว่าระบบมีการใช้พลังงานต่อหนึ่งวัน ดังตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 4 ตัวอย่างส่วนหนึ่งของผลลัพธ์พลังงานแต่ละชั่วโมงที่ได้จากซอฟต์แวร์ KU2EPA

| Time (hours) | E_{in} (kW-h) | $E_{dissipated}$ (kW-h) | E_{out} (kW-h) |
|--------------|-----------------|-------------------------|------------------|
| 0 | 6.38 | 0.59 | 5.79 |
| 1 | 6.32 | 0.50 | 5.82 |
| 2 | 6.95 | 0.61 | 6.35 |
| 3 | 6.49 | 0.53 | 5.97 |
| 4 | 7.87 | 0.66 | 7.21 |
| 5 | 13.28 | 1.38 | 11.91 |
| 6 | 21.99 | 3.24 | 18.75 |
| 7 | 24.34 | 3.9 | 20.44 |
| 8 | 23.64 | 3.73 | 19.91 |
| 9 | 22.09 | 3.37 | 19.32 |
| 10 | 18.07 | 2.67 | 15.4 |
| ... | ... | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... |
| 23 | 7.05 | 0.73 | 6.32 |
| kW-h/day | 323.88 | 44.18 | 279.69 |
| % | 100.00 | 13.64 | 86.36 |

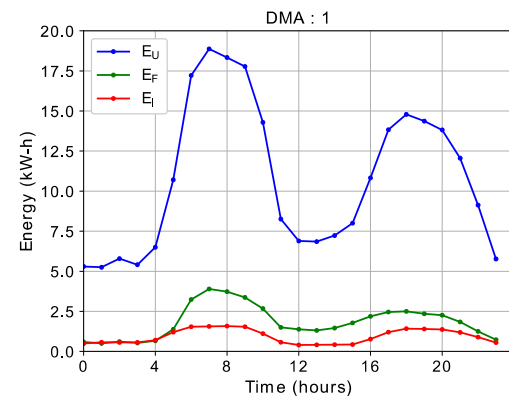
ตารางที่ 5 ผลของพลังงานแต่ละองค์ประกอบของพื้นที่ศึกษาที่ 1 (DMA : 1)

| | | |
|---------------------------------------|--|--------------------------------------|
| E_{in} (323.88 kW-h/day) 100% | E_{out} (279.69 kW-h/day) 86.36% | E_U (257.29 kW-h/day) 79.44% |
| | | E_L (22.41 kW-h/day) 6.92% |
| | $E_{dissipated}$ (44.18 kW-h/day) 13.64% | E_F (44.18 kW-h/day) 13.64% |

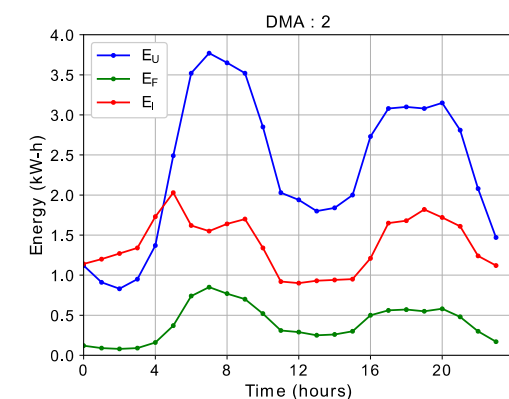
ตารางที่ 6 ผลของพลังงานแต่ละองค์ประกอบของพื้นที่ศึกษาที่ 2 (DMA : 2)

| | | |
|--------------------------------------|---|-------------------------------------|
| E_{in} (98.94 kW-h/day) 100% | E_{out} (89.33 kW-h/day) 90.29% | E_U (56.08 kW-h/day) 56.68% |
| | | E_L (33.25 kW-h/day) 33.61% |
| | $E_{dissipated}$ (9.6 kW-h/day) 9.71% | E_F (9.6 kW-h/day) 9.71% |

จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถพล็อตกราฟเพื่อแสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในแต่ละองค์ประกอบรายชั่วโมงแต่ละ DMA ได้ดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 กราฟแสดงพลังงานที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชั่วโมงของพื้นที่ศึกษาที่ 1 (DMA : 1)



รูปที่ 5 กราฟแสดงพลังงานที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชั่วโมงของพื้นที่ศึกษาที่ 2 (DMA : 2)

จากผลของพลังงานในพื้นที่ศึกษาพบว่า DMA : 1 มี $E_U=257.29$ kW-h/day (79.44%), $E_F=44.18$ kW-h/day (13.64%) และ $E_I=22.41$ kW-h/day (6.92%) ในขณะที่ DMA : 2 มี $E_U=56.08$ kW-h/day (56.68%), $E_F=9.6$ kW-h/day (9.71%) และ $E_I=33.25$ kW-h/day (33.61%) จะสังเกตได้ว่าในพื้นที่ใฝ่ระวางที่ 1 มีพลังงานที่ส่งถึงผู้ใช้น้ำที่สูงกว่าและมีพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากน้ำรั่วต่ำกว่า จึงกล่าวได้ที่มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าพื้นที่ใฝ่ระวางที่ 2 ซึ่งหากจะปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในแต่ละพื้นที่ให้ดีขึ้น การทราบถึงพลังงานในแต่ละองค์ประกอบ จะทำให้สามารถตัดสินใจได้ว่าพื้นที่ใฝ่ระวางที่ 1 ควรปรับปรุงขนาดท่อเพื่อลด E_F และ พื้นที่ใฝ่ระวางที่ 2 ควรซ่อมแซมรอยรั่วเพื่อลดปริมาณน้ำสูญเสียซึ่งจะทำให้ E_I ลดลง

5.3. กรณีศึกษาที่ 1

จากผลของพลังงานใน DMA : 1 จะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีเนื่องจากพลังงานโดยส่วนมากส่งถึงผู้ใช้น้ำ ในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของ DMA : 1 โดยการเพิ่มขนาดของท่อที่มีการสูญเสียเหตุการณ์หนึ่งหน่วยเกินกว่า 0.45 เมตร/กิโลเมตร ขึ้นอีก 50 มิลลิเมตร (ยกเว้นท่อขนาด 300 มิลลิเมตร) เพื่อลด E_F จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 7 ตารางที่ 7 แสดงผลลัพธ์ก่อนและหลังกรณีศึกษาที่ 1

| ตัวแปร | ก่อน | หลัง |
|--|----------------------|----------------------|
| อัตราการไหลเข้า (m ³ /day) | 8,394.28 | 8,409.14 |
| อัตราการไหลถึงผู้ใช้น้ำ (m ³ /day) | 7,750.39 (92.33%) | 7,750.61 (92.17%) |
| น้ำสูญเสีย (m ³ /day) | 643.89 (7.67%) | 658.53 (7.83%) |
| E_{in} (kW-h/day) | 323.88 | 324.45 |
| E_U (kW-h/day) | 257.29 (79.44%) | 262.18 (80.81%) |
| E_I (kW-h/day) | 22.41 (6.92%) | 23.34 (7.19%) |
| E_F (kW-h/day) | 44.18 (13.64%) | 38.91 (11.99%) |

ผลของกรณีศึกษาที่ 1 จะเห็นได้ว่า E_U สูงขึ้นเป็น 262.18 kW-h/day (80.81%) ซึ่งสูงกว่าก่อนขยายท่อ 4.89 kW-h/day (1.37%) และ E_F ลดลงเป็น 38.91 kW-h/day (11.99%) ซึ่งต่ำกว่าก่อนขยายท่อ 5.27 kW-h/day (1.65%) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบดีขึ้น และในความเป็นจริงแล้ว E_I จะอาจลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนเส้นท่อนั้นทำให้รอยรั่วน้อยลงด้วยเช่นกัน

5.4. กรณีศึกษาที่ 2

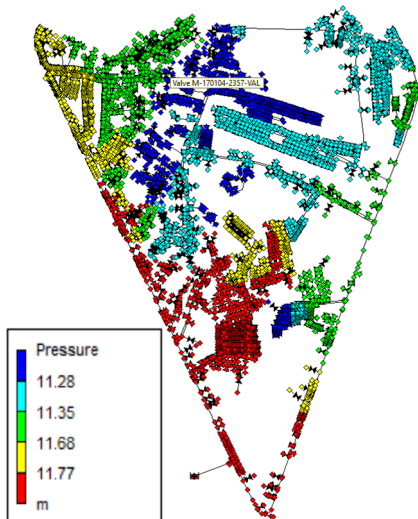
จากผลของพลังงานใน DMA : 2 จะเห็นได้ว่าการสูญเสียพลังงานไปกับน้ำรั่วสูงถึง 33.61% ภายใต้สถานะแรงดันที่ต่ำที่สุด (Critical Pressure Point : CPP) เท่ากับ 4.38 เมตร ปัจจุบัน กปน. ยังไม่มีการกำหนดเกณฑ์แรงดันขั้นต่ำ ซึ่งถ้าเทียบกับต่างประเทศที่มีการกำหนดนั้นแรงดันขั้นต่ำของ กปน. ถือว่าต่ำกว่า ตัวอย่างเช่น ประเทศอังกฤษกำหนดแรงดันขั้นต่ำเท่ากับ 7 เมตร [4] เป็นต้น ความจำเป็นที่ต้องมีการกำหนดเกณฑ์แรงดันขั้นต่ำ เพราะว่าแรงดันต่ำเกินไปจะส่งผลกระทบต่อ 2 ส่วน ได้แก่ 1.) คุณภาพน้ำประปาลดลงเนื่องจากสิ่งปนเปื้อนภายนอกสามารถถูกดันเข้ามาภายในระบบผ่านทางรอยรั่วได้ และ 2.) การระบุตำแหน่งรอยรั่วทำได้ยากและไม่แม่นยำ ทำให้ไม่สามารถลดน้ำสูญเสียได้อย่างยั่งยืน

ปัจจุบัน กปน. ใช้เครื่องมือตรวจรอยรั่วในท่อประปาด้วยเสียง (leak noise correlator) ซึ่งจากการศึกษาของ Stuart Hamilton ในประเทศเวียดนามเครื่องมือนี้จะสามารถหาตำแหน่งรอยรั่วบนท่อชนิด PVC ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อแรงดันไม่ต่ำกว่า 10 เมตร จะเห็นได้ว่าแรงดัน DMA : 2 ในปัจจุบันต่ำกว่าข้อกำหนดดังกล่าวทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งของรอยรั่วบนท่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยฉบับนี้จึงเสนอการขึ้นแรงดันต้นทางชั่วคราวให้ CPP ไม่ต่ำกว่า 10 เมตร เพื่อที่จะสามารถระบุตำแหน่งรอยรั่วที่แน่ชัดและทำการซ่อมแซมเพื่อให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบดีขึ้น โดยการขึ้นแรงดันต้นทางจะทำให้มีการใช้พลังงาน ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงผลลัพธ์ก่อนและหลังกรณีศึกษาที่ 2

| ตัวแปร | ก่อน | หลัง |
|--|----------------------|----------------------|
| อัตราการไหลเข้า (m ³ /day) | 5,064.30 | 6,975.29 |
| อัตราการไหลถึงผู้ใช้น้ำ (m ³ /day) | 3,167.05 (62.54%) | 3,167.05 (45.94%) |
| น้ำสูญเสีย (m ³ /day) | 1,897.25 (37.46%) | 3,808.24 (54.60%) |
| E_{in} (kW-h/day) | 98.94 | 254.71 |
| E_U (kW-h/day) | 56.08 (56.68%) | 106.59 (41.85%) |
| E_I (kW-h/day) | 33.25 (33.61%) | 125.88 (49.42%) |
| E_F (kW-h/day) | 9.6 (9.71%) | 22.22 (8.72%) |

ผลของกรณีศึกษาที่ 2 จะเห็นได้ว่าหากขึ้นแรงดันเพื่อให้ CPP มีค่าไม่ต่ำกว่า 10 เมตร จำเป็นต้องใช้ E_m เพิ่มเป็น 254.71 kW-h/day และจะมี E_I เพิ่มขึ้นจากเดิม 92.63 kW-h/day (15.81%)



รูปที่ 6 แรงดันของ DMA : 2 หลังเพิ่มแรงดันต้นทาง

6. สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

จากการศึกษาประเมินพลังงานของพื้นที่เฟ้ระวัง 2 พื้นที่ในการดูแลของสำนักงานการประปาสาขาสมุทรปราการ โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2561 พบว่าพื้นที่เฟ้ระวังที่ 1 มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดี โดยมีพลังงานที่ส่งถึงผู้ใช้น้ำสูงถึง 79.44% ของพลังงานที่จ่ายให้แก่ระบบ และพื้นที่เฟ้ระวังที่ 2 มีพลังงานที่ส่งถึงผู้ใช้น้ำ 56.58% แต่มีพลังงานที่สูญเสียไปกับน้ำรั่วที่สูงถึง 33.61% ซึ่งควรได้รับการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบงานวิจัยฉบับนี้จึงได้จัดทำกรณีศึกษา 2 กรณี เพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบ โดย

- กรณีศึกษาที่ 1 ได้ทำการเพิ่มขนาดท่อในพื้นที่ DMA : 1 เพื่อลด E_F ซึ่งพบว่าระบบมี E_U มากขึ้นซึ่งหมายความว่าระบบมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีขึ้น
- กรณีศึกษาที่ 2 ได้ทำการเพิ่มแรงดันต้นทางชั่วคราวเพื่อให้แรงดันต่ำที่สุดไม่น้อยกว่า 10 เมตร เพื่อที่จะสามารถระบุตำแหน่งรอยรั่วในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นทำให้สามารถลดน้ำสูญเสียได้อย่างยั่งยืน ดังนั้น E_L ที่เพิ่มขึ้นของกรณีศึกษาจะเป็นการเพิ่มขึ้นชั่วคราวเท่านั้น

จากผลการศึกษาที่กล่าวมาทั้งหมด แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและประโยชน์ของซอฟต์แวร์ KU2EPA อย่างชัดเจน โดยซอฟต์แวร์สามารถคำนวณสมดุลพลังงานได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว และสามารถแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในแต่ละองค์ประกอบในรายชั่วโมงได้ ซึ่งทำให้สามารถตัดสินใจเลือกกลยุทธ์ในการจัดการโครงข่ายท่อน้ำประปาที่นำไปสู่การพัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. กิตติกรรมประกาศ

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

8. การอ้างอิง

- [1] Sutthisak Lappasert, Adichai Pornprommin, Surachai Lipiwattanakarn, Suwatana Chittaladakorn (2017). Energy Balance of a Trunk Main Network in Bangkok, Thailand. AWWA Journal of the American Water Works Association, E18-E27. DOI: 10.1002/awwa.1053
- [2] Brent R.P. (1973). Algorithms for Minimization without Derivatives. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 116-155
- [3] Cabrera E., M.A. Pardo, R. Cobacho, Cabrera E.Jr. (2010). Energy Audit of Water Networks. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, 670-677. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000077
- [4] Ofwat (2017). The guaranteed standards scheme (GSS): summary of standards and conditions. Water Services Regulation Authority, England and Wales, 9-11
- [5] U.S. EPA (2017). Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual. Environmental Protection Agency, USA, 1-30
- [6] Surachai Lipiwattanakarn, Adichai Pornprommin, Sutthisak Lappasert (2019). Impact of Water Losses on Pressure and Energy in MWA Trunk Main Network, Thailand. THA 2019 International Conference on "Water Management and Climate Change towards Asia's Water-Energy-Food Nexus and SDGs", January 23-25, Bangkok, Thailand.
- [7] Lindell E. Ormsbee (1989). Implicit Network Calibration. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, 243-257. ISSN 0733-9496/89/0002-0243
- [8] M.A. Pardo, A.Riquelme, J. Melgarejo (2019). A tool for calculating energy audits in water pressurized networks. AIMS Environmental Science, 94-107. DOI: 0.3934/environsci.2019.2.94