



การเฝ้าระวังน้ำสูญเสียสำหรับโครงข่ายท่อประธานด้วยวิธีสมดุลน้ำ

Water Loss Monitoring System for Trunk Main System by Water Balance Method

แพรวา จาววงศ์สันต์¹ จิระเมธ ช้างคล่อม^{1*} อติชัย พรพรหมินทร์¹ ชัยพร ใจแก้ว² และสุรชัย ลิปิวัฒนาการ¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10100

² ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10100

Praewa Jowwongsan¹, Jiramate Changklom^{1*}, Adichai Pornprommin¹, Chaiporn Jaikaeo² and Surachai Lipiwattanakarn¹

¹ Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

50 Ngamwongwan Road, Lat yao, Chatuchak, Bangkok, 10900

² Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

50 Ngamwongwan Road, Lat yao, Chatuchak, Bangkok, 10900

*ผู้รับผิดชอบบทความ: jiramate.ch@ku.th เบอร์โทรศัพท์ 06-4814-0542

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

บทคัดย่อ

น้ำสูญเสียในระบบส่งน้ำเป็นปัญหาสำคัญของหน่วยงานประปาของประเทศไทย โดยระบบส่งน้ำสามารถแบ่งเป็นโครงข่ายท่อประธานและโครงข่ายท่อจ่ายน้ำ การประมาณการหวน (กปน.) คาดว่าโครงข่ายท่อประธานมีน้ำสูญเสีย 60-120 ล้าน ลูกบาศก์เมตรต่อปี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอระบบเฝ้าระวังน้ำสูญเสียท่อประธานด้วยวิธีสมดุลน้ำสำหรับ 4 เส้นทางของสาขาประปาขึ้นของ กปน. ที่มีข้อมูลมาตรวัดค่อนข้างน่าเชื่อถือ การทำสมดุลน้ำที่ใช้มี 2 วิธี คือ 1) สมดุลน้ำระยะยาว โดยคำนวณน้ำสูญเสียต่อเนื่องจากข้อมูลมาตรถาวรในระบบตรวจวัดระยะไกล SCADA และ 2) สมดุลน้ำระยะสั้น ในกรณีมาตรถาวรบางตัวมีปัญหาจะปิดมาตรเพื่อไม่ให้ไหลผ่านจุดนั้นในช่วงกลางคืนทำให้สามารถคำนวณน้ำรั่วได้ชั่วคราวประมาณ 2-3 ชั่วโมง ผลการทำสมดุลน้ำวิธีที่ 1 พบว่า สามารถคำนวณน้ำสูญเสียบนเส้นทางได้ดีหากมาตรทุกตัวทำงานปกติ และวิธีที่ 2 สามารถคำนวณน้ำสูญเสียชั่วคราวได้ดี โดยทั้งสองวิธีมีความคลาดเคลื่อนในหลักสิบ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แสดงว่าระบบเฝ้าระวังนี้มีประสิทธิภาพในการติดตามน้ำรั่วบนท่อประธานได้

คำสำคัญ ท่อประธาน น้ำประปา น้ำรั่ว น้ำสูญเสีย สมดุลน้ำ

Abstract

Water loss (WL) in water distribution systems (WDS) is a main problem of waterworks in Thailand. A WDS can be divided into a trunk main network (TMN) and a water distribution network. Metropolitan Waterworks Authority (MWA) estimates WL in its TMN about 60-120 million m³/year. Thus, this research presents a monitoring system using the water balance method for 4 routes of the MWA Prachachuen Branch TMN with fairly complete permanent measured flow data from the Remote Monitoring System. Water balance consists of 2 cases: 1) long-term water balance for continuous WL calculation by the data of permanent meters in SCADA systems, and 2) short-term water balance for



the case that some flow meters malfunction. By closing water flowing through those meters temporarily at night, WL can be computed for a short period of 2-3 hours. The results show that 1st method can calculate WL if all flow meters work properly. 2nd method can temporarily estimate WL. And both methods estimate WL with a flow discrepancy of tens digit m^3/hr . Thus, the system is effective in monitoring leakage on TMN.

Keywords: Trunk Mains, Potable Water, Leakage, Water Loss, Water Balance

1. บทนำ

น้ำสูญเสียในระบบสูบน้ำจ่ายน้ำของ กปน. แบ่งตามโครงข่ายท่อได้เป็น 2 ส่วน คือ น้ำสูญเสียบนท่อประปา และบนท่อจ่ายน้ำท่อบริการ ในรายงานประจำปี กปน. ปี 2562 นั้น พบว่า กปน. มีปริมาณน้ำผลิต 2075.2 ล้าน ลบ.ม./ปี คิดเป็นน้ำสูญเสีย 607.8 ล้านลบ.ม./ปี [1] เป็นน้ำสูญเสียในระบบท่อประปาประมาณ 3-6% [2] คิดเป็นปริมาณน้ำสูญเสียบนท่อประปา 60-120 ล้าน ลบ.ม./ปี เนื่องจากการติดตามน้ำสูญเสียในระบบท่อประปานั้นทาง กปน. ยังไม่มีระบบหรือวิธีการที่ชัดเจน ต่างจากน้ำสูญเสียบนท่อจ่ายที่ใช้ระบบเทคโนโลยีระบบตรวจวัดข้อมูลและควบคุมระยะไกล – (Supervisory Control Data and Acquisition SCADA) ซึ่งมีหลักการแบ่งพื้นที่ย่อยเป็นระบบพื้นที่เฝ้าระวัง (District Metering Area, DMA) ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการอยู่แล้ว อีกทั้งการใช้เครื่องมือในการตรวจหาท่อรั่วจำเป็นต้องใช้งบประมาณและบุคลากรในการหาจุดรั่วไหลในแต่ละครั้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการทำสมดุลน้ำในการติดตามหาน้ำสูญเสียในระบบท่อประปา โดยเลือกทดสอบ 4 เส้นทางของท่อประปาในพื้นที่ประปาประชาชื่น

วัตถุประสงค์

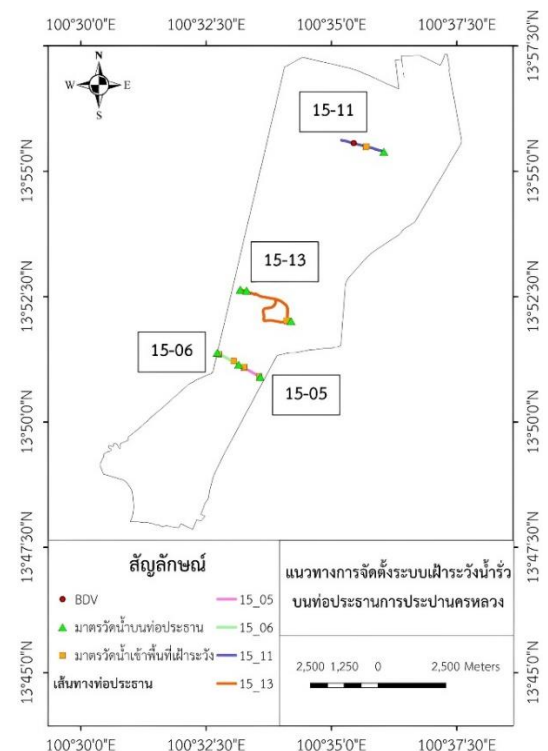
1) วิเคราะห์การเฝ้าระวังน้ำรั่วบนท่อประปาด้วยวิธีการทำสมดุลน้ำของสำนักงานประปาสาขาประชาชื่น

2) เปรียบเทียบการเฝ้าระวังน้ำรั่วบนท่อประปาระหว่างการทำสมดุลน้ำตอนปิดประตูน้ำในตอนกลางคืนกับไม่ปิดประตูน้ำ

พื้นที่ที่ศึกษา

ศึกษาในพื้นที่การประปาประชาชื่น ซึ่งเป็น 1 ใน พื้นที่ประปา 18 สาขา ตั้งอยู่ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ในพื้นที่ประปาประชาชื่นนั้นได้แบ่งเส้นทางท่อประปาออกเป็นเส้นทางย่อย ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกที่จะศึกษาผลของเส้นทางที่ 15-05, 15-06, 15-11 และ 15-13 ทั้งหมด 4 เส้นทาง ดัง

แสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากทั้ง 4 เส้นทางนี้ถือเป็นเส้นทางที่มีจำนวนมาตรน้อยและมาตรหลักบนท่อประปาใช้การได้ โดยทั้ง 4 เส้นทางมีมาตรวัดน้ำ 16 มาตร แบ่งเป็นมาตรวัดน้ำบนท่อประปา (U/UZ) 7 มาตร และมาตรวัดน้ำบนท่อจ่าย (DM) 9 มาตร ทั้งนี้มาตรวัดน้ำบนท่อประปามี 2 ประเภท U คือมาตรวัดน้ำที่วัดปริมาณน้ำผ่านเข้าออกพื้นที่ให้บริการของสำนักงานประปาสาขา UZ คือมาตรวัดน้ำที่วัดปริมาณน้ำผ่านพื้นที่แต่ละโซนในพื้นที่ให้บริการ นอกจากนี้สำนักงานประปาสาขาประชาชื่นยังรับน้ำโดยตรงจากสถานีสูบน้ำบางเขนโรงที่ 3 และ 4 (BK03, BK04) ทำให้มีมาตรวัดน้ำที่มีสัญลักษณ์ขึ้นต้นด้วย BK



รูปที่ 1 เส้นทางท่อประปาทั้ง 4 เส้นทางมาตรวัดน้ำในงานวิจัยนี้เป็นมาตรหลักติดตั้งถาวร ซึ่ง กปน. มีการตรวจสอบและเปรียบเทียบค่าในระบบ โดยมาตรวัดน้ำบนท่อประปา (U/UZ) เป็นมาตรประเภท Ultrasonic Flowmeter ที่มีความคลาดเคลื่อน 1-3% [3] ขึ้นอยู่กับรูป



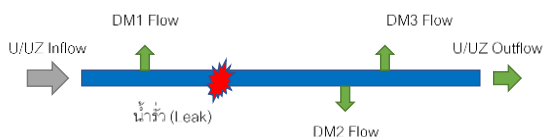
หน้าตัดและความถูกต้องของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ป้อนให้ และมาตรวัดน้ำบนท่อจ่าย (DM) เป็นมาตรประเภท Magnetic Flowmeter ที่มีความคลาดเคลื่อน 0.3 -0.35% [4] เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของมาตร U/UZ พบว่ามีค่าประมาณระหว่าง 500-5,000 ม³/ชม ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจมีค่าระหว่าง 5-150 ม³/ชม ต่อมาตร ขณะที่อัตราการไหลของมาตร DM มีค่าประมาณหลักสิบและหลักร้อยจึงคาดว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำมาก เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของมาตร U/UZ นั้นจึงเป็นไปได้ว่า การทำสมดุลน้ำอาจให้ค่าการรั่วไหลตกอยู่ในระดับหลักสิบถึงหลักร้อยขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและจำนวนมาตร U/UZ ที่ใช้บนเส้นทางที่พิจารณา

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีสมดุลน้ำ (Water Balance) สมดุลน้ำ (Water Balance) เป็นหลักการพื้นฐานของการไหล โดยอาศัยหลักกฎการอนุรักษ์มวล (Conservative Of Mass) คือ มวลของสสารย่อมไม่สูญหายแต่อาจเปลี่ยนรูปได้ ดังนั้นในกรณีของน้ำไหลในเส้นท่อก็สามารถอนุมานได้ว่าอัตราการไหลรวมในเส้นท่อที่พิจารณาต้องมีค่าคงที่ ฉะนั้นหากวัดอัตราการไหลเข้าออกจากเส้นท่อทั้งหมด จะสามารถหาค่าการรั่วไหลที่เกิดขึ้นในเส้นท่อนั้น ๆ ได้จากผลต่างของอัตราการไหลเข้าและอัตราการไหลออก

การจัดทำสมดุลน้ำของท่อประปาในระดับเส้นท่อ โดยอาศัยข้อมูลจากมาตร U/UZ และมาตร DM จะทำให้สามารถแบ่งเส้นท่อประปาเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงสมดุลน้ำว่ามีค่าผิดปกติได้สะดวก และทำให้สามารถระบุบริเวณท่อรั่วบนท่อประปาได้ ลักษณะการทำสมดุลน้ำบนท่อประปาในระดับเส้นท่อแสดงดังรูปที่ 2 และสมการที่ (1)



รูปที่ 2 การจัดทำสมดุลน้ำบนท่อประปาในระดับเส้นท่อ

$$\sum Q_{U,in} - \sum Q_{U,out} - \sum Q_{DM} = Q_{leak} \quad (1)$$

โดย $Q_{U,in}$ และ $Q_{U,out}$ คือ ปริมาณน้ำไหลเข้าและออกของมาตรวัดอัตราการไหลและแรงดันหลักที่อยู่บนท่อประปา

(U) ตามลำดับ Q_{DM} คือปริมาณน้ำของมาตรวัดอัตราการไหลและแรงดันของท่อจ่าย (DM) และ Q_{leak} คือปริมาณของน้ำรั่วในระบบเส้นทางท่อประปา

โดยวิธีสมดุลน้ำเป็นเงื่อนไขเบื้องต้นในการลดการสูญเสีย น้ำในระบบประปา เพียงแต่การทำสมดุลน้ำส่วนมากนั้นมักถูกจำกัดด้วยปริมาณของข้อมูลและประสิทธิภาพของเครื่องมือ [5] ตัวอย่างเช่นการทำสมดุลน้ำเพื่อลดการสูญเสียของน้ำที่ไม่ก่อให้เกิดรายได้ในระบบประปาโดยใช้ระบบ DMA ที่เมือง Antalya ประเทศตุรกี และ เมือง Kos ประเทศกรีซที่ไม่มีระบบ SCADA ทำให้ข้อมูลการไหลไม่ได้รับการตรวจสอบเท่าที่ควร [6]

2.2 วิธีการ

- 1) แบ่งท่อประปาพื้นที่ กปน. ประชาชื่นเป็นเส้นทางย่อย
- 2) นำข้อมูลอัตราการไหลและแรงดันของแต่ละมาตรวัดจากทาง กปน. ประชาชื่นมาทำสมดุลน้ำระยะยาวในแต่ละเส้นทางท่อประปา
- 3) เลือกเส้นทางท่อประปาที่มีจำนวนมาตรวัดไม่มากเพื่อทำการปิดประตูน้ำมาตร DM ชั่วคราวในช่วงกลางคืน
- 4) นำข้อมูลในช่วงที่ปิดประตูน้ำมาตร DM มาทำสมดุลน้ำระยะสั้น
- 5) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทำสมดุลน้ำ โดยปิดและไม่ปิดประตูน้ำมาตร DM ทั้งนี้เนื่องจากการค่าอัตราการไหลในระบบนั้นมีค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมาตรวัด จึงมีโอกาที่ผลลัพธ์สมดุลน้ำจะมีค่าติดลบได้

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ทำการศึกษาจากเส้นทางท่อประปาทั้ง 4 เส้นทาง ได้แก่ เส้นทาง 15-05, 15-06, 15-11 และ 15-13 โดยรายละเอียดมาตรและทิศทางการไหลในแต่ละเส้นทางมีดังตารางที่ 1 และรูปที่ 3 ตามลำดับ

โดย Route 15-05 ทำสมดุลน้ำรายชั่วโมง ช่วง 18-25 ธ.ค. 2563, Route 15-06 ทำช่วง ม.ค. – เม.ย. 2564, Route 15-11 ได้ทำช่วง 13 – 16 ก.ค. 2563 และ Route 15-13 ทำตั้งแต่ช่วง ม.ค. – มิ.ย. 2564 ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่มาตรมีค่าน่าเชื่อถือ กล่าวคือมาตรทุกมาตรมีค่าไม่เป็นศูนย์และไม่มีค่าค้าง และทำสมดุลน้ำระยะสั้นในแต่ละ Route อีกครั้งขณะที่ปิดประตูน้ำมาตร DM เป็นจำนวนเส้นทางละสองคืน



ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งในการทำสมมูลน้ำระยะยาวนั้นได้มีการจัดรูปแบบกราฟเป็นกราฟน้ำรั่ว (Leak, ม3/ชม.) เนื่องจากกราฟสมมูลน้ำที่ได้ยังคงมีค่าแกว่งสูงเพราะอัตราการไหลในเส้นท่อที่วัดไม่คงที่จนทำให้อ่านรูปแบบที่เกิดขึ้นยาก จึงมีการปรับแก้กราฟด้วยการเฉลี่ยค่าในช่วง 24 ชั่วโมงเพื่อให้การแกว่งของกราฟมีความสม่ำเสมอขึ้น โดยมีผลลัพธ์ในแต่ละ Route ดังนี้

ตารางที่ 1 มาตรการที่ใช้ทำสมมูลน้ำรายเส้นทางท่อประธาน

Route	Inflow	Outflow	No. meters
15-05	UZ1501 U105	DM-15-04-04-02 DM-15-04-04-01 DM-15-04-03-01	5
15-06	U209	UZ1501 DM-15-05-02-01 DM-15-05-01-01	4
15-11	U139	DM-15-08-01-01 DM-15-07-05-01 BDV	4
15-13	BK03-Phayathai BK04-Phayathai	U231 DM-15-05-05-01 DM-15-05-04-01	5

ตารางที่ 2 ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละเส้นทาง

Route	สมมูลน้ำระยะยาว	สมมูลน้ำระยะสั้น
15-05	18 – 25 ธันวาคม 2063	(คืนที่ 1) 8 กรกฎาคม 2564 (คืนที่ 2) 12 กรกฎาคม 2564
15-06	มกราคม – เมษายน 2564	(คืนที่ 1) 17 พฤษภาคม 2564 (คืนที่ 2) 24 พฤษภาคม 2564
15-11	13 – 16 กรกฎาคม 2563	(คืนที่ 1) 13 พฤษภาคม 2564 (คืนที่ 2) 18 พฤษภาคม 2564
15-13	มกราคม - มิถุนายน 2564	(คืนที่ 1) 17 มิถุนายน 2564 (คืนที่ 2) 21 มิถุนายน 2564

3.1 Route 15-05

3.1.1 การทำสมมูลน้ำระยะยาวของ Route 15-05

ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4 ใน Route นี้ หากดูเฉพาะช่วงเวลา 18-25 ธันวาคม 2563 ซึ่งเป็นช่วงที่คาดว่าค่าทุกมาตรมีความน่าเชื่อถือ ส่วนกราฟบางส่วนที่มีค่าโดดอย่างเห็นได้ชัดนั้นเป็นเพราะช่วงที่มาตร Outflow ของเส้นทางลดต่ำ

พอดี โดยมีค่าการรั่วอยู่ระหว่าง ± 10 ม³/ชม จึงคาดว่าช่วงเวลาดังกล่าวไม่มีน้ำรั่วในเส้นทางนี้

3.1.2 การทำสมมูลน้ำโดยปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-05

มีการปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-05 สองคืน ได้แก่คืนวันที่ 8 ก.ค. 2564 (08/07/64 23:15 น.-09/07/64 01:15 น.) และ 12 ก.ค. 2564 (12/07/64 23:45 น.-13/07/64 01:45 น.) ตามลำดับ

โดยในคืนที่ 1 ปิด DM-15-04-04-01, DM-15-04-03-01 และ DM-15-04-04-02 คืนที่ 2 ปิด DM-15-04-04-01 และ DM-15-04-04-02

ผลจากการทำสมมูลน้ำราย 15 นาทีคืนที่ 1 และ 2 แสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ พบว่าค่าการรั่วในช่วงปิด DM ติดลบสูงมาก คาดว่ามาจากมาตร U105 เพราะเมื่อเทียบกับค่าการไหลมาตรอื่นในเส้นทางเดียวกันแล้ว พบว่าค่าของมาตร U105 สูงมากผิดปกติ รวมถึงทิศการไหลของน้ำมีการสลับไปมาอย่างมีแบบแผนในหนึ่งวัน โดยช่วงเวลาประมาณ 23:00 น. ถึง 05:00 น. เป็นทิศหนึ่ง และช่วง 04:00 น.- 22:00 น.เป็นอีกทิศหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 7 จึงสันนิษฐานว่ามาตร U105 เก็บค่าผิดพลาด ดังนั้นระบุไม่ได้ว่า Route 15-05 นี้มีการรั่วไหลเกิดขึ้นหรือไม่

3.2 Route 15-06

3.2.1 การทำสมมูลน้ำระยะยาวของ Route 15-06

ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 8 โดยมาตร DM-15-05-02-01 มีข้อมูลถึงแค่ 25 ธ.ค. 2563 เท่านั้น รวมถึง UZ1501 ยังมีค่าค้างดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนั้นช่วง ม.ค. – เม.ย. 2564 เป็นช่วงที่คาดว่าค่าทุกมาตรมีความน่าเชื่อถือ ส่วนท้ายกราฟที่มีค่าโดดอย่างเห็นได้ชัดนั้นเป็นเพราะมาตร DM-15-05-02-01 ให้ค่าลดลงใกล้เคียงศูนย์ (ค่าอยู่ในช่วง 0.xx ถึงหลักหน่วย) ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่ข้อมูลตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อนตอนเก็บค่า ดังนั้นค่าการรั่วของเส้นทางนี้อยู่ระหว่าง ± 50 ม³/ชม

3.2.2 การทำสมมูลน้ำโดยปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-06

มีการปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-06 สองคืน ได้แก่คืนวันที่ 17พ.ค.2564 (18/05/64 00:00 น.- 01:30 น.) และ 24พ.ค.2564 (24/05/64 23:45 น.-25/05/64 01:15 น.) ตามลำดับ



โดยคืนที่ 1 ปิด DM-15-05-02-01 และ DM-15-05-01-01
ในขณะที่คืนที่ 2 ปิดแค่ DM-15-05-02-01

ผลของสมมูลน้ำราย 15 นาที่คืนที่ 1 แสดงดังรูปที่ 9
พบว่าช่วงที่ปิด DM ค่าการรั่วอยู่ในช่วง -30 ถึง 60 ม³/ชม

ผลของสมมูลน้ำราย 15 นาที่คืนที่ 2 แสดงดังรูปที่ 10
พบว่าช่วงที่ปิด DM ค่าการรั่วอยู่ในช่วง -20 ถึง 11 ม³/ชม ถือ
ว่าเป็นค่าที่น้อยมาก อาจเป็นเพราะเกิดการผิดพลาดของ
มาตรวัด นอกจากนี้ เส้นทางนี้ตัวมาตร DM-15-05-02-01 เสีย
ไม่สามารถดึงค่ามาได้ ทำให้ไม่สามารถทำสมมูลน้ำระยะ
ยาวในช่วงเวลานี้ แต่ด้วยวิธีสมมูลน้ำระยะสั้นที่ทำการปิด
มาตรที่เสีย ทำให้พบว่า Route 15-06 ไม่มีการรั่วไหล

3.3 Route 15-11

3.3.1 การทำสมมูลน้ำระยะยาวของ Route 15-11

รูปที่ 11 พบว่า กราฟน้ำรั่วช่วงก่อนวันที่ 14 ก.ค. 2563
มีค่าใกล้ศูนย์ (ไม่มีน้ำรั่ว) แต่หลังจากวันที่ 14 ก.ค. 2563 เป็น
ต้นไป พบว่า น้ำรั่วสูงขึ้นฉับพลันที่ระดับ 250 ม³/ชม ต่อเนื่อง
สาเหตุเกิดจาก กปน. ได้เปิดประตูน้ำกั้นระหว่างท่อประจักษ์
กับขอบเขต DMA (Boundary Valve, BDV) เพื่อจ่ายน้ำออก
จากท่อประจักษ์เข้า DMA เพิ่มอีกหนึ่งจุดที่ไม่ใช่จุด DM เพราะ
แรงดันใน DMA ไม่เพียงพอ แต่จุดจ่ายน้ำใหม่นี้ไม่มีการ
ตรวจวัดน้ำจึงคาดว่าค่าการรั่วที่เพิ่มขึ้นน่าจะเป็นน้ำจ่ายออก
ผ่าน BDV ดังกล่าว จึงสรุปว่าเส้นทางดังกล่าวไม่มีการรั่วไหล

3.3.2 การทำสมมูลน้ำโดยปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-11

มีการปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-11 สองคืน
ได้แก่คืนวันที่ 13 พ.ค. 2564 (13/05/64 23:45 น.-14/05/
64 01:30 น.) และ 18 พ.ค. 2564 (18/05/64 23:45 น.-
19/05/64 04:15 น.) ตามลำดับ

โดยในคืนที่ 1 ปิด DM-15-08-01-01 ,DM-15- DM-15-
07-05-01 และ BDV ในขณะที่คืนที่ 2 ปิดแค่ BDV

ผลลัพธ์จากการทำสมมูลน้ำราย 15 นาที่คืนที่ 1 ปรากฏ
ดังรูปที่ 12 พบว่าช่วงที่ทำการปิด DM นั้น ค่าการรั่วลดจน
ใกล้เคียงศูนย์

ส่วนการทำสมมูลน้ำราย 15 นาที่คืนที่ 2 ปรากฏดังรูปที่
13 พบว่าช่วงที่ทำการปิด BDV นั้น ค่าการรั่วลดจนใกล้เคียง
ศูนย์ดังนั้นจึงสรุปว่า Route 15-11 ไม่มีการรั่ว

3.4 Route 15-13

3.4.1 การทำสมมูลน้ำระยะยาวของ Route 15-13

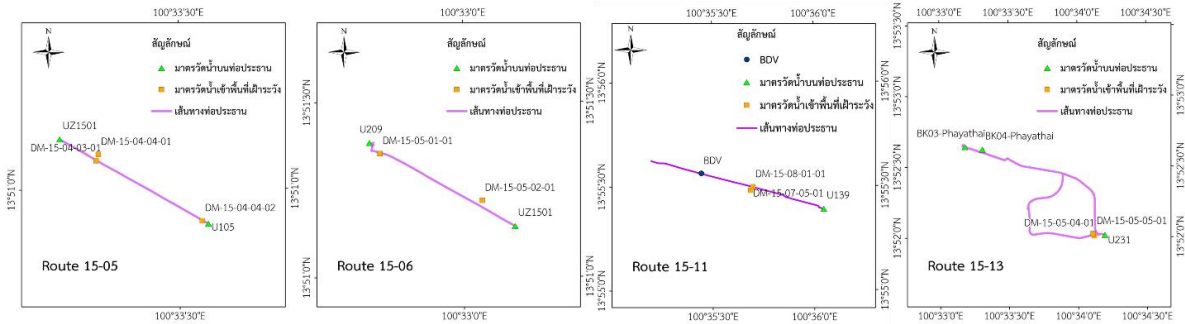
จากกราฟรูปที่ 14 ค่าเกือบทั้งหมดติดลบ เป็นผลมา
จาก Inflow BK03-Phayathai และ BK04-Phayathai จ่าย
น้ำน้อยกว่า U231 ซึ่งเป็นไปไม่ได้เพราะ BK ทั้งคู่เป็นโรงสูบน้ำ
จ่ายน้ำต้นทาง จึงระบุไม่ได้ว่ามีการสูญเสียในเส้นทางนี้
หรือไม่ ส่วนช่วงที่กราฟติดลบผิดปกติอย่างเห็นได้ชัดเป็นช่วง
ที่มาตร BK ทั้งสองไม่มีค่าในระบบ คาดว่าเป็นความผิดพลาด
ของการเก็บค่าการตรวจวัด

3.4.2 การทำสมมูลน้ำโดยปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-13

การปิดประตูน้ำมาตร DM ของ Route 15-13 สองคืน
ได้แก่คืนวันที่ 17 มิ.ย. 2564 (18/06/64 00:00 น. – 02:00 น.)
และ 21 มิ.ย. 2564 (22/06/64 00:00 น. - 01:00 น.) ตามลำดับ

โดยคืนที่ 1 ปิด DM-15-05-04-01 และ DM-15-05-05-
01 คืนที่ 2 ปิดแค่ DM-15-05-05-01

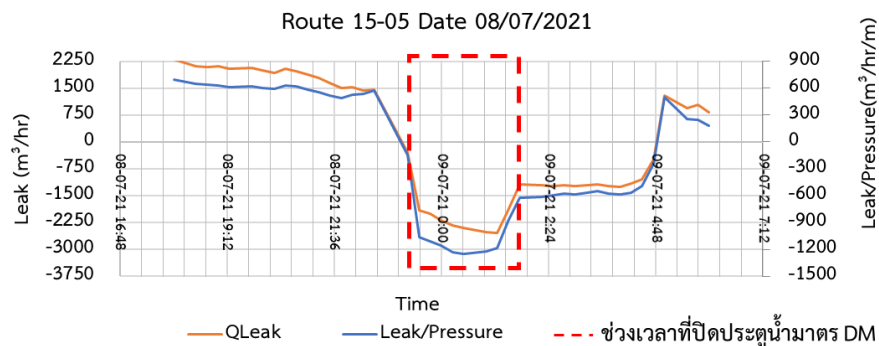
ผลลัพธ์ของสมมูลน้ำรายชั่วโมงคืนที่ 1 และ 2 เป็นดังรูป
ที่ 15 และรูปที่ 16 ตามลำดับ เหตุที่ Route นี้มีการทำสมมูล
น้ำต่างไปเป็นเพราะข้อมูลอัตราการไหลของโรงสูบน้ำจ่ายเป็น
รายชั่วโมง ซึ่งค่าอัตราการรั่วไหลนั้นติดลบสูงมาก เพราะ
BK03-Phayathai และ BK04-Phayathai จ่ายน้ำน้อยกว่า
U231 ที่เป็น outflow ซึ่งไม่ควรเป็นไปไม่ได้ คาดว่ามาตร
U231 อาจเก็บข้อมูลผิดพลาด จึงทดสอบติดตั้งมาตรวัดค่าการ
ไหลของมาตร U231 เทียบกับค่าในระบบ ผลลัพธ์แสดงในรูป
ที่ 17 พบว่าค่าการไหลที่วัดจากการทำงานภาคสนามน้อยกว่า
ค่าในระบบราว 100-300 ม³/ชม ขณะที่ผลจากสมมูลน้ำมีค่า
อยู่ในช่วง 400 ถึง -600 ม³/ชม ดังนั้นนอกจากจะสรุปได้ว่า
มาตร U231 วัดค่าไม่ตรงกับความเป็นจริงแล้ว ยังสรุปได้ว่า
BK03-Phayathai และ BK04-Phayathai มีข้อผิดพลาดใน
การวัดอีกด้วย ทำให้สรุปไม่ได้ว่ามีการรั่วไหลเกิดขึ้นหรือไม่



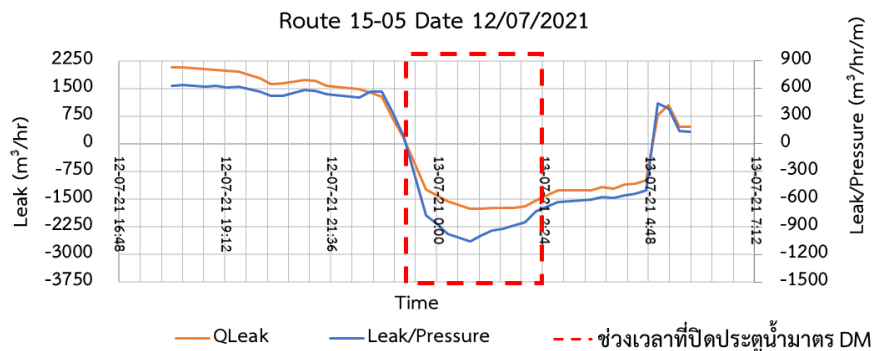
รูปที่ 3 ทิศทางการไหลในแต่ละเส้นทางท่อประปา



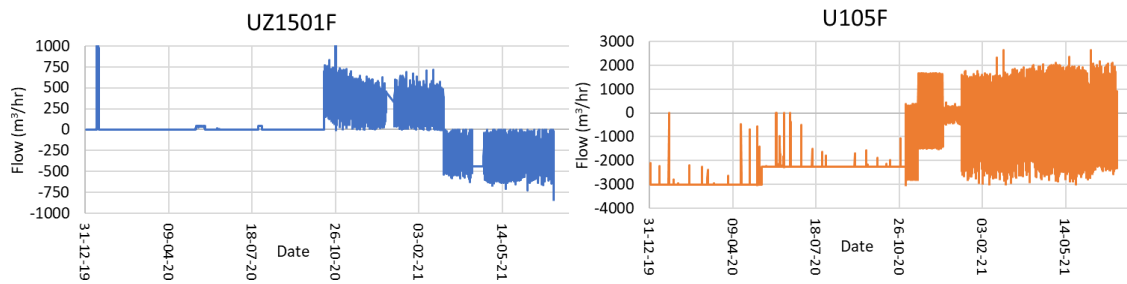
รูปที่ 4 สมดุลน้ำระยะยาว วันที่ 18-25 ธันวาคม 2563 ของเส้นทางท่อประปา 15-05 (บน น้ำรั่ว, ล่าง น้ำรั่วต่อแรงดัน)



รูปที่ 5 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-05 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คืบที่ 1 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



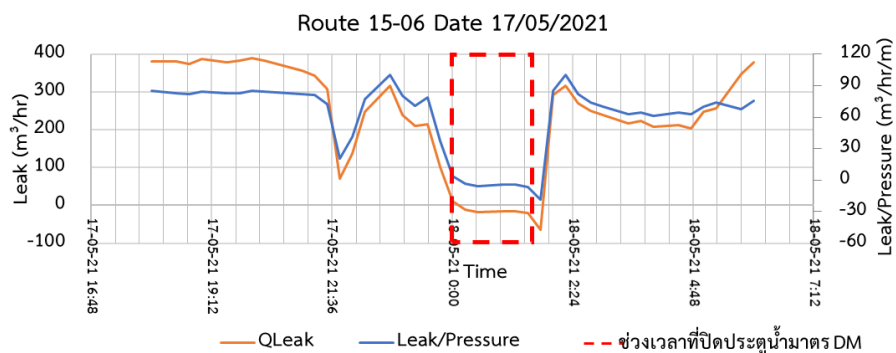
รูปที่ 6 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-05 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คืบที่ 2 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



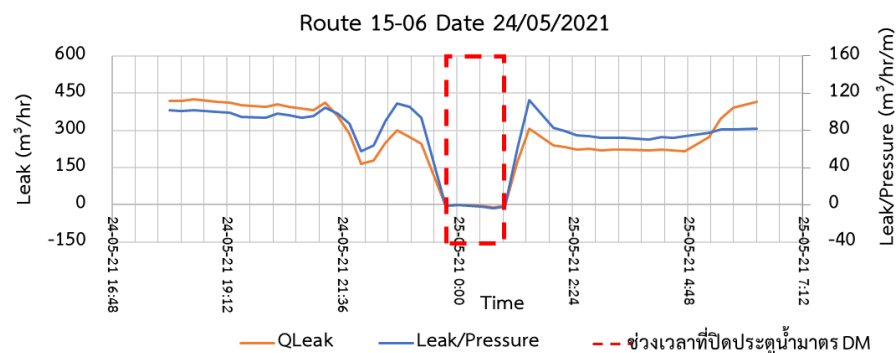
รูปที่ 7 อัตราการไหลของน้ำในมาตร UZ1501 และ U105 1 ม.ค. 2563 ถึง 14 ก.ค. 2564



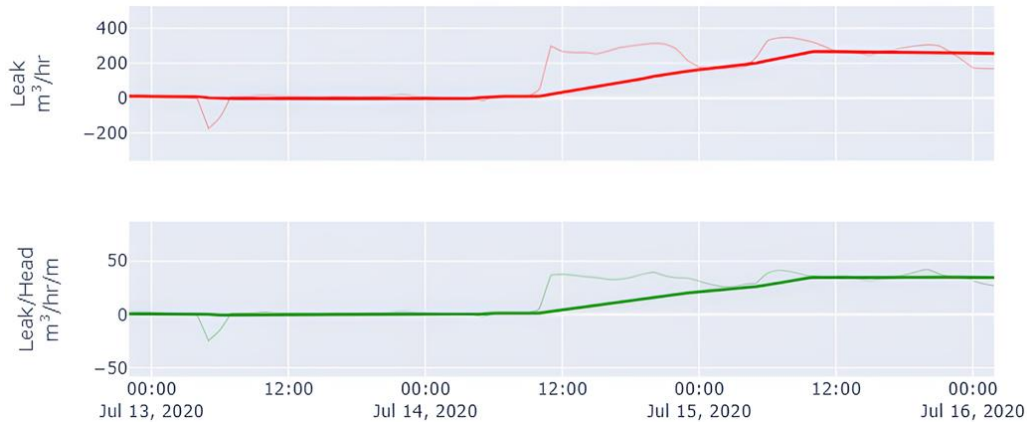
รูปที่ 8 สมดุลน้ำระยะยาว มกราคม ถึง เมษายน 2564 ของเส้นทางท่อประปา 15-06 (บน น้ำรั่ว, ล่าง น้ำรั่วต่อแรงดัน)



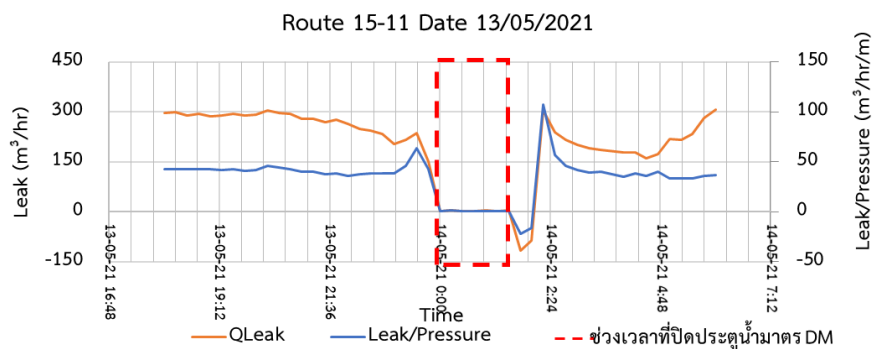
รูปที่ 9 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-06 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คันทันที่ 1 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



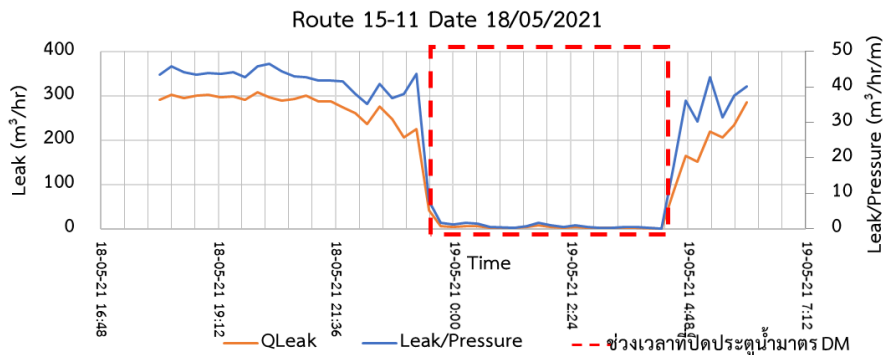
รูปที่ 10 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-06 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คันทันที่ 2 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



รูปที่ 11 สมดุลน้ำระยะยาว วันที่ 13 – 16 กรกฎาคม 2563 ของเส้นทางท่อประปา 15-11 (บน น้ำรั่ว, ล่าง น้ำรั่วต่อแรงดัน)



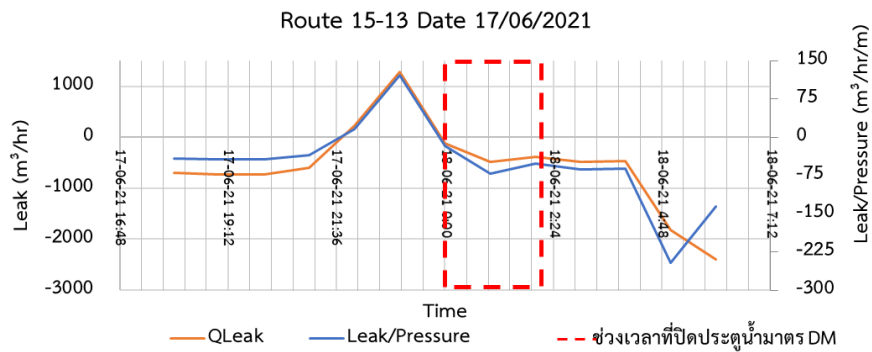
รูปที่ 12 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-11 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คัดที่ 1 (กรอบสีเหลี่ยมเส้นประสีแดง)



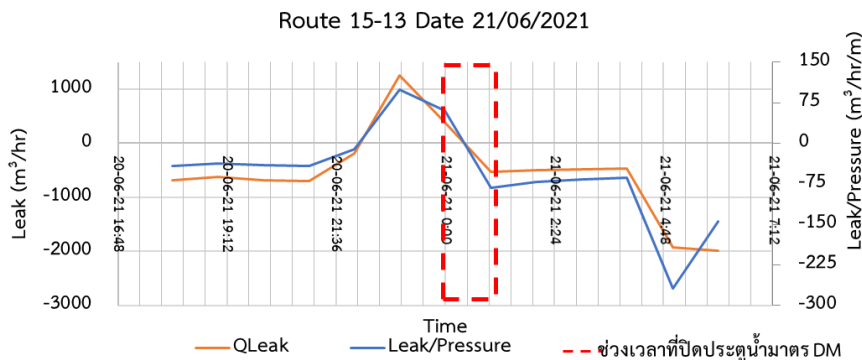
รูปที่ 13 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-11 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คัดที่ 2 (กรอบสีเหลี่ยมเส้นประสีแดง)



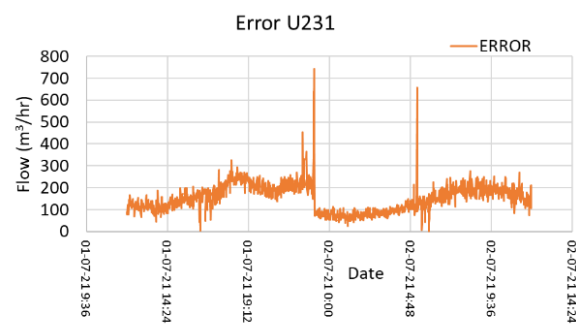
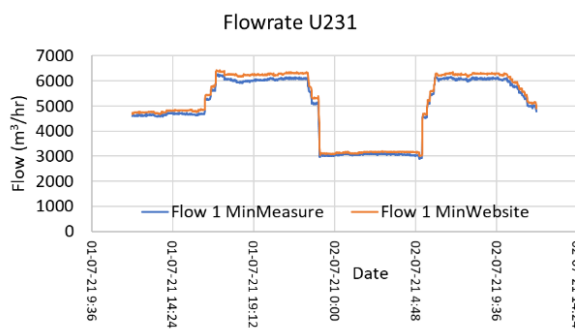
รูปที่ 14 สมดุลน้ำระยะยาว มกราคม ถึง มิถุนายน 2564 ของเส้นทางท่อประปา 15-13 (บน น้ำรั่ว, ล่าง น้ำรั่วต่อแรงดัน)



รูปที่ 15 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-13 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คับที่ 1 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



รูปที่ 16 สมดุลน้ำของเส้นทางท่อประปา 15-13 ในช่วงที่มีการปิดประตูน้ำมาตร DM คับที่ 2 (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)



รูปที่ 17 เปรียบเทียบอัตราการไหลจากการวัดภาคสนามและค่าในระบบของมาตรวัด U231 (ซ้าย เปรียบเทียบค่า ขวา ค่าผิดพลาด)

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการทำสมดุลน้ำทั้งแบบระยะยาวและแบบระยะสั้นโดยปิดประตูน้ำมาตร DM ในตอนกลางคืนของทั้ง 4 Route ได้แก่ Route 15-05, 15-06, 15-11 และ 15-13 โดยสมดุลน้ำระยะยาวนั้นพบว่าการแกว่งของกราฟมากเกินไปเพราะจำนวนของข้อมูล ทำให้ดูแนวโน้มกราฟยาก รวมถึงบางช่วงยังมีความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดค่าดังที่แสดงในกราฟข้างต้น จึงปรับแก้ค่าเพิ่มด้วยวิธีเฉลี่ย 24 ชั่วโมงเพื่อให้กราฟเสถียรยิ่งขึ้น

ผลของสมดุลน้ำระยะยาวนั้น Route 15-05 และ 15-06 ไม่มีการรั่ว ส่วน Route 15-11 เห็นชัดว่ามีการรั่วไหลน้อยมากในช่วงก่อน 14 ก.ค. 2563 และกราฟมีแบบแผนหลังวันดังกล่าว คาดว่าเกิดจากการแบ่งจ่ายน้ำไปยัง BDV และ Route 15-13 ข้อมูลมาตรไม่สมบูรณ์จึงระบุไม่ได้ว่ามีการรั่วไหลหรือไม่

ผลการทำสมดุลน้ำระยะสั้นจากการปิดประตูน้ำมาตร DM Route ละ 2 คับ พบว่า Route 15-05 และ 15-13 ข้อมูลมาตรไม่สมบูรณ์จึงสรุปไม่ได้ว่ามีการรั่วไหลหรือไม่ ส่วน Route 15-06 เมื่อปิดมาตร DM-15-05-02-01 ที่ไม่



สามารถดึงค่ามาได้ นั่นพบว่าไม่มีการรั่ว ส่วน Route 15-11 นั้นให้ค่าใกล้เคียงศูนย์เมื่อมีการปิด BDV

เมื่อนำผลลัพธ์จากสมมูลน้ำทั้งสองแบบในงานวิจัยชิ้นนี้ มาเทียบกัน เห็นได้ว่าเป็นไปตามเงื่อนไข กล่าวคือการทำสมมูลน้ำระยะยาวจำเป็นต้องมีมาตรที่มีค่าสมบูรณ์ทุกมาตร จึงจะสามารถวิเคราะห์การรั่วไหลได้ เช่น Route 15-05, 15-06 และ 15-11 ที่เห็นผล ขณะที่สมมูลน้ำระยะสั้นสามารถใช้ได้แม้ว่ามาตรสมบูรณ์ไม่ครบทุกมาตร เนื่องจากสามารถปิดเฉพาะมาตรที่เสียได้ เช่น Route 15-06 แต่มีข้อเสียคือหากมาตรที่มีปัญหาเป็นมาตรหลักบนท่อประธาน (U) แล้วจะทำสมมูลน้ำระยะสั้นได้ยาก เพราะปิดมาตรไม่ได้ หากมาตร U เสียขึ้นต้องซ่อมเท่านั้นเพื่อให้ทำสมมูลน้ำในระบบได้ โดยจากการทำสมมูลน้ำในกรณีศึกษาทั้งแบบระยะยาวและระยะสั้นพบว่ามีความคลาดเคลื่อนได้ถึง 10^{-3} ลิตร/ชม

สถาบันวิจัยอุตสาหกรรมน้ำของสหราชอาณาจักร (UK Water Industry Research) ได้ออกคู่มือ Best Practice การแบ่งพื้นที่สำหรับเฝ้าระวังการรั่วไหลของท่อประธาน ซึ่งมีกรณีศึกษาที่พบค่าความคลาดเคลื่อนของมาตรเฉลี่ยที่ 3.46% และระบบสามารถตรวจพบน้ำรั่วบนเส้นทางหนึ่งมีค่า $320 \text{ m}^3/\text{ชม}$ [7] ซึ่งงานวิจัยได้ดำเนินงานในลักษณะเดียวกันกับคู่มือดังกล่าว และได้ผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพในการตรวจพบน้ำรั่วใกล้เคียงกัน (ระดับหลักร้อย) แสดงให้เห็นว่า กปน. ควรนำแนวทางการทำสมมูลน้ำไปเป็นแนวทางพิจารณาเรื่อง Trunk Main Monitoring Zone ในการติดตามน้ำสูญเสียในท่อประธานรวมถึงสามารถวิเคราะห์กรณีมาตรวัดให้ค่าผิดปกติบนเส้นทางอื่น ๆ ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากการประปานครหลวง ทุนวิจัยเลขที่ กนว. 23/2563 และทุนวิจัยระดับปริญญาโท จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุนวิจัยเลขที่ 64/01/WE/M.Eng และขอขอบพระคุณ นายจรรุเดช เก่งรักษัสัตว์ และนายกันต์ เชิดชู เจ้าหน้าที่การประปานครหลวง ที่ให้ความช่วยเหลืองานภาคสนามอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] MWA. Annual report 2019 Metropolitan Waterworks Authority. 2019. Thai
- [2] Lapprasert S, Pornprommin A, Lipiwattanakarn S, Chittaladakorn S. Energy balance of a trunk main network in Bangkok, Thailand: J AWWA. - Am Water Works Assoc. 2018 Jul; 110(7):E18–27.
- [3] US300FM UltrasonicFlowmeter (DISCONTINUED) Available from: <https://www.yokogawa.com/th/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/flow-meters/magnetic-flowmeters/#Overview> [Accessed 1st October 2021].
- [4] Magnetic Flowmeters Available from: <https://www.yokogawa.com/th/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/flow-meters/magnetic-flowmeters/#Resources>. [Accessed 1st October 2021].
- [5] Klingel P, Knobloch A. A review of water balance application in water supply. J. - Am Water Works Assoc. 2015 Jul;107(7):E339–50.
- [6] Kanakoudis V, Muhammetoglu H. Urban water pipe networks management towards non-revenue water reduction: Two case studies from Greece and Turkey: Urban Water Pipe Networks Management Towards NRW Reduction. CLEAN - Soil Air Water. 2014 Jul;42(7):880–92.
- [7] Brammer M, Cartwright K, Collins D, Parker S. Best practice for upstream flow monitoring zones. London: UK Water Industry Research:2020.