

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งจุดรั่วไหลด้วยเทคนิคแบบไม่รุกรานและแบบรุกราน

Comparison of Leakage Localization Efficiency by Non-intrusive and Intrusive Techniques

จิตติภัทร เกลิม¹, พรโสภา เอี่ยมสุใส², วิวิธชัย ตั้งคำ³, ศุภกิตติ์ สิ้นไชย⁴, ณัฐพล จารูมิลกุล⁵, อติชัย พรพรหมินทร์^{6*} และ ชัยพร ใจแก้ว⁷

¹⁻⁶ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

⁷ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10900

*Corresponding author; E-mail address: E-mail address: adichai.p@ku.th

บทคัดย่อ

การรั่วไหลของน้ำประปาทำให้ลดประสิทธิภาพและเพิ่มต้นทุนการดำเนินงาน ดังนั้นการลดน้ำรั่วไหลเชิงรุกเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อตรวจจับและระบุตำแหน่งจุดรั่วไหลได้รวดเร็วขึ้น เครื่องมือที่ใช้วิธีสัมพันธ์สัญญาณเสียงเป็นเครื่องมือระบุตำแหน่งจุดรั่วไหลที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการวิเคราะห์ช่วงเวลาหน่วงของเสียงรั่ว (Δt) ที่เดินทางถึงเซ็นเซอร์ 2 ตัวที่ติดตั้งคล่อมจุดรั่วไหล เมื่อนำ Δt มาคูณกับค่าความเร็วเสียงในท่อ (c) จะวิเคราะห์ระยะจุดรั่วได้ การศึกษาได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิค 2 แบบ คือ แบบไม่รุกรานที่ใช้มาตรความเร่ง (Accelerometers) และแบบรุกรานที่ใช้ไฮโดรโฟน (Hydrophones) กับระบบท่อทางเดียวจำลองบนผิวดินที่มีระยะห่างระหว่าง 2 เซ็นเซอร์ (L) ตั้งแต่ 5.80 เมตร ถึง 42.80 เมตร โดยจำลอง 3 อัตราการรั่วไหล คือ 11.88 (Q_H), 5.52 (Q_M) และ 0.54 (Q_L) ลิตรต่อวินาที ผลการทดลอง พบว่า 1) เมื่อ L เพิ่มขึ้นความแม่นยำมีแนวโน้มลดลง แต่หากจุดรั่วอยู่บริเวณ $L/2$ ความแม่นยำจะสูงขึ้นเนื่องจาก Δt มีค่าน้อย 2) ในกรณีจุดรั่วมีอัตราการรั่วไหลต่ำไฮโดรโฟนมีประสิทธิภาพในการตรวจจับตำแหน่งรอยรั่วได้ดีกว่ามาตรความเร่ง 3) เมื่อระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ (L) เพิ่มขึ้น ความคลาดเคลื่อน (ΔL) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเนื่องจากค่าความเร็วเสียง (c) ที่ตั้งไว้ที่ 660 เมตรต่อวินาทีอาจไม่ตรงกับความจริง จึงได้ปรับค่า c ด้วยฟังก์ชัน Solver ใน Excel เพื่อให้ RMSE ต่ำที่สุด ส่งผลให้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งรอยรั่วดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลลัพธ์นี้ช่วยสนับสนุนการเลือกเทคนิคภาคสนามที่เหมาะสม และการพัฒนาฟังก์ชันการคำนวณค่า c เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบตรวจจับจุดรั่วในอนาคต

คำสำคัญ: โครงข่ายท่อจ่ายน้ำ, น้ำสูญเสีย, การลดน้ำสูญเสียเชิงรุก, การระบุตำแหน่งจุดรั่ว, วิธีการฟังเสียงเพื่อตรวจจับจุดรั่ว

Abstract

Water leakage in distribution systems reduces operational efficiency and increases operating costs. Therefore, proactive leakage control is essential for accelerating the detection and localization of leakage points. Acoustic correlation-based tools are effective instruments for leak localization, utilizing the principle of analyzing the time delay (Δt) of leak-induced sound signals received by two sensors installed across the leakage point. By multiplying Δt by the speed of sound in the pipe (c), the distance to the leakage point can be determined. This study compares the efficiency of two techniques: the non-intrusive method using accelerometers and the intrusive method using hydrophones, tested on a simulated single-pipeline system placed on the ground surface, with the distance between two sensors (L) ranging from 5.80 meters to 42.80 meters. Three leakage flow rates were simulated: 11.88 (Q_H), 5.52 (Q_M), and 0.54 (Q_L) liters per minute. The experimental results revealed that: 1) As L increased, localization accuracy tended to decrease; however, when the leakage point was located near the midpoint $L/2$, accuracy improved due to a shorter Δt . 2) In cases of low leakage flow rates, hydrophones demonstrated superior performance in detecting leakage positions compared to accelerometers. 3) As the distance between sensors (L) increases, the error (ΔL) tends to increase linearly. This is likely because the assumed speed of sound (c) at 660 meters per second does not accurately reflect the actual conditions. Therefore, c was adjusted using the Solver function in Excel to minimize the RMSE, resulting in a significant improvement in leak localization accuracy. These findings support the selection of appropriate field techniques and the development of adaptive

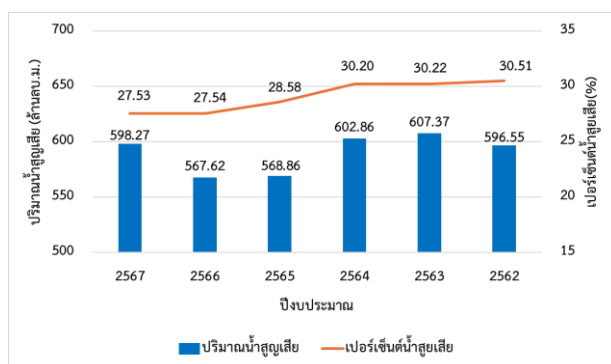
c-calculation functions to enhance the performance of future leak detection systems
Keywords: water distribution network, water loss, active leakage control, leak localization, acoustic leak detection

1. คำนำ

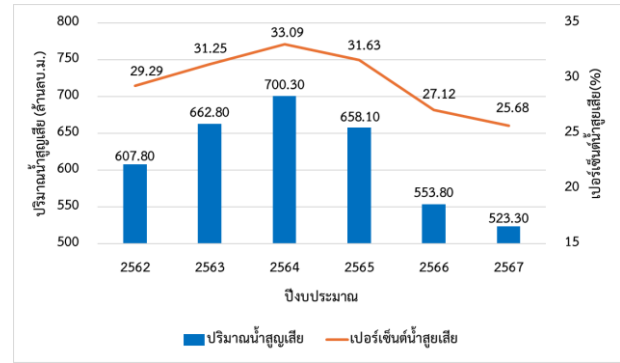
การรั่วไหลของน้ำในระบบประปาเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบจัดการน้ำทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีการขยายตัวของชุมชนและความต้องการใช้น้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] การรั่วไหลไม่เพียงแต่เป็นการสูญเสียทรัพยากรน้ำโดยเปล่าประโยชน์ หากยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งแวดลอมอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย [2]

ปัญหาการรั่วไหลมักเกิดจากหลายสาเหตุ อาทิ อายุการใช้งานของท่อที่ยาวนานเกินไป การเสื่อมสภาพของวัสดุท่อ การติดตั้งหรือการซ่อมบำรุงที่ไม่ได้มาตรฐาน รวมถึงแรงดันในระบบที่สูงเกินไป เมื่อเกิดรอยรั่วในท่อ ระบบจะสูญเสียน้ำที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์หรือจัดเก็บรายได้ ซึ่งเรียกว่า น้ำไม่ก่อให้เกิดรายได้ (Non-Revenue Water: NRW)

การประปาส่วนภูมิภาค (กปภ.) เป็นหน่วยงานที่ให้บริการน้ำประปาครอบคลุมทั่วประเทศ ยกเว้นในพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ โดยในช่วงปีงบประมาณ พ.ศ. 2562–2567 กปภ. มีปริมาณน้ำสูญเสียเฉลี่ย เท่ากับ 590.25 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 29.10 ของปริมาณน้ำที่ผลิตจ่ายทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 1 [3] ขณะเดียวกัน การประปานครหลวง (กปน.) ซึ่งให้บริการเฉพาะพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ มีปริมาณน้ำสูญเสียเฉลี่ยในปีงบประมาณ พ.ศ. 2562–2567 เท่ากับ 617.58 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 29.67 ของน้ำที่ผลิตจ่าย ดังแสดงในรูปที่ 2 [4] โดยอัตราน้ำสูญเสียของทั้งสองหน่วยงานอยู่ในระดับที่สูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาระต้นทุนของหน่วยงานมาก



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสูญเสีย เปอร์เซ็นต์น้ำสูญเสีย และปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 ถึง 2567 ของ กปภ.



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสูญเสีย เปอร์เซ็นต์น้ำสูญเสีย และปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 ถึง 2567 ของ กปน.

ในเชิงปฏิบัติการรั่วไหลที่ไม่ได้รับการตรวจพบและซ่อมแซมอย่างทันท่วงที อาจนำไปสู่ปัญหาต่อเนื่อง เช่น ความเสียหายของโครงสร้างพื้นฐาน การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเข้าสู่ระบบน้ำดื่ม และแรงดันในระบบที่ไม่เสถียร ส่งผลให้คุณภาพการให้บริการของระบบประปาลดลง และเกิดความไม่พึงพอใจจากผู้ใช้

การลดน้ำรั่วไหลจึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการลดน้ำสูญเสีย โดย การตรวจจับและระบุตำแหน่งจุดรั่วไหลอย่างแม่นยำและรวดเร็ว ซึ่งจะช่วยให้หน่วยงานสามารถดำเนินการซ่อมแซมได้ทันท่วงที ลดการสูญเสียที่ไม่ก่อให้เกิดรายได้ ลดผลกระทบต่อคุณภาพการบริการ และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบประปาโดยรวม [5-6] การนำเทคโนโลยีที่เหมาะสมมาใช้ในการตรวจสอบการตรวจจับจุดรั่วจึงเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญในการบรรเทาปัญหาด้านการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าในระยะยาว

เทคโนโลยีการวิเคราะห์สัญญาณเสียง (Acoustic Leak Detection) เป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมในการตรวจจับการรั่วไหลของน้ำในระบบท่อประปา [7-8] โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อเกิดการรั่วไหลของน้ำในท่อน้ำ จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นเสียงหรือแรงสั่นสะเทือน ซึ่งสามารถตรวจจับได้ผ่านเซ็นเซอร์ จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ตรวจจับได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีสัมพันธ์สัญญาณเสียงแบบไขว้ (Cross-Correlation Method) เพื่อหาช่วงเวลาของเสียงหน่วง (Time-lag, Δt) โดยวิเคราะห์จากสัญญาณเสียงจุดรั่วที่เดินทางไปถึงเซ็นเซอร์ทั้งสองตัวที่ติดตั้งคร่อมจุดรั่วไหล เมื่อนำ Δt มาคูณกับค่าความเร็วเสียงในท่อ (c) จะวิเคราะห์ระยะจุดรั่วได้

การศึกษานี้ทดลองจุดรั่วไหล 1 จุด โดยจำลอง 3 อัตราการรั่วไหล ได้แก่ อัตราการรั่วไหลสูง (Q_H) วัดอัตราการไหลได้ 11.88 ลิตรต่อวินาที อัตราการรั่วไหลปานกลาง (Q_M) วัดอัตราการไหลได้ 5.52 ลิตรต่อวินาที และอัตราการรั่วไหลต่ำ (Q_L) วัดอัตราการไหลได้ 0.54 ลิตรต่อวินาที โดยใช้เครื่องมือตรวจจับรอยรั่วด้วยเสียงรุ่น Eureka3 โดยใช้การตรวจจับ 2 เทคนิค คือ แบบไม่รุกล้ำ (Non-intrusive) ซึ่งไม่สัมผัสโดยตรงกับน้ำภายในท่อ โดยสามารถติดตั้งเครื่องมือจากภายนอกได้ เหมาะสำหรับระบบที่ไม่สามารถหยุดการไหลของน้ำ โดยใช้มาตรความเร่ง (Accelerometers) เป็นเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดคลื่นแรงสั่นสะเทือนบนผิวท่อที่เกิดจากจุดรั่วไหล และแบบรุกล้ำ (Intrusive) ซึ่งต้องมีการสัมผัสหรือเชื่อมต่อกับน้ำโดยตรง

ภายในท่อ โดยใช้ไฮโดรโฟน (Hydrophones) เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดคลื่นเสียงที่เกิดจากจุดรั่วไหลผ่านตัวกลางน้ำ กับระบบท่อทางเดียวจำลองบนผิวดินที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการที่ระยะห่างระหว่าง 2 เซ็นเซอร์ (L) ตั้งแต่ 5.80 เมตร ถึง 42.80 เมตร

การศึกษานี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่าง 2 เทคนิค คือ แบบไม่รุกล้ำที่ใช้มาตรความเร่ง และแบบไม่รุกล้ำที่ใช้ไฮโดรโฟน โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Δl) และระยะห่างระหว่าง 2 เซ็นเซอร์ (L) และหาค่า Root Mean Square Error (RMSE) เพื่อศึกษาความแม่นยำในการระบุตำแหน่งระหว่าง 2 เทคนิค และผลการศึกษาพบว่า ค่า Δl แนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นรูปแบบเชิงเส้นตรง ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าค่า c ที่เครื่องมือประเมินได้เท่ากับ 660 เมตรต่อวินาที อาจไม่สอดคล้องกับค่าจริง จึงได้ปรับค่า c โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ของโปรแกรม Excel เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยอิงจากเงื่อนไขของค่า RMSE ต่ำสุด ซึ่งส่งผลให้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจุดรั่วดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยปัจจัยที่อาจมีผลต่อค่า c ได้แก่ ชนิดท่อ ขนาดท่อ ความดันในท่อ อัตราการรั่วไหล สภาพการติดตั้งรวมถึงประเภทของเทคนิคที่ใช้ตรวจจับสัญญาณเสียงการรั่วไหล

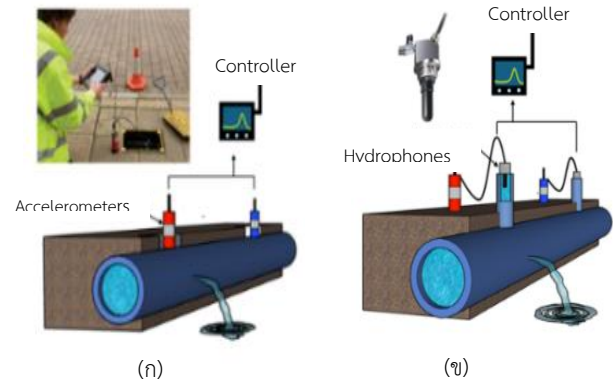
ปัจจุบัน หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการประปาในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังคงใช้วิธีการฟังเสียงร่วมกับอุปกรณ์แท่งฟังเสียง (Listening stick) ในการค้นหาท่อรั่ว อย่างไรก็ตาม การแตกรั่วในระบบท่อประปาที่วัสดุเป็นพลาสติก เช่น PVC หรือ HDPE ซึ่งมีคุณสมบัติต้านน้ำต่ำกว่า 10 เมตร อาจทำให้เสียงรั่วไหลมีความถี่ต่ำกว่า 20 เฮิรตซ์ ซึ่งอยู่นอกขอบเขตการได้ยินของมนุษย์ด้วยเหตุนี้ การระบุตำแหน่งจุดรั่วไหลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณเสียงที่สามารถตรวจจับเสียงในย่านความถี่ต่ำได้ จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าเทคนิคการฟังเสียงด้วยมนุษย์ทั่วไป อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้นทุนและความยุ่งยากในการดำเนินงานของแต่ละเทคนิคมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน จึงมีความจำเป็นต้องเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่าง ๆ เพื่อเลือกเทคนิคที่เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละกรณี ทั้งนี้ ประโยชน์ของการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจเลือกเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติงานในภาคสนาม และสามารถนำไปต่อยอดในการพัฒนาการสร้างฟังก์ชันคำนวณค่า c ที่เหมาะสมภายใต้สภาวะต่าง ๆ เพื่อยกระดับความแม่นยำของระบบตรวจจับจุดรั่วไหลในอนาคต

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งจุดรั่วไหล 2 เทคนิค ได้แก่ แบบไม่รุกล้ำที่ใช้มาตรความเร่ง และแบบรุกล้ำที่ใช้ไฮโดรโฟน 2) เพื่อประเมินผลค่า c ต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจุดรั่วไหล

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 กระบวนการระบุตำแหน่งจุดรั่วไหล

การศึกษานี้ได้ทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งจุดรั่วไหล 2 เทคนิค 1) แบบไม่รุกล้ำที่ใช้มาตรความเร่ง 2) แบบรุกล้ำที่ใช้ไฮโดรโฟน ดังแสดงในรูปที่ 3 และแต่ละวิธีการมีลักษณะการทำงานและข้อได้เปรียบเสียเปรียบดังแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 3 (ก) เทคนิคแบบไม่รุกล้ำที่ใช้มาตรความเร่ง
(ข) เทคนิคแบบรุกล้ำที่ใช้ไฮโดรโฟน

ตารางที่ 1 ลักษณะการทำงานและข้อได้เปรียบเสียเปรียบของแต่ละวิธีการ

ประเภท	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
เทคนิคแบบไม่รุกล้ำที่ใช้มาตรความเร่ง (Non-intrusive technique using accelerometers)	- ติดตั้งง่ายโดยไม่ต้องเจาะท่อ (สัมผัสกับผิวท่อ) - มีความแม่นยำสูงในบางสถานการณ์ - ไม่รบกวนการใช้งานระบบน้ำ	- ประสิทธิภาพลดลงในกรณีของท่อพลาสติก - ค่าอุปกรณ์สูงกว่าแบบฟังเสียงด้วยมนุษย์ - มีโอกาสตรวจจับเสียงรบกวนจากภายนอกสูง
เทคนิคแบบรุกล้ำที่ใช้ไฮโดรโฟน (Intrusive technique using hydrophones)	- ความแม่นยำสูงมาก - เหมาะสำหรับตรวจจบบรอยรั่วขนาดเล็ก - ตรวจสอบเสียงภายในระบบโดยตรง	- ต้องตัดแปลงท่อเพื่อให้อุปกรณ์ให้สัมผัสน้ำโดยตรง - รบกวนการใช้งานระบบน้ำ (ช่วงติดตั้งและถอด) - ค่าใช้จ่ายสูงกว่ามาตรวัดเร่ง

2.2 กระบวนการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบไขว้ (Cross-Correlation Analysis) และ การคำนวณระยะของจุดรั่ว

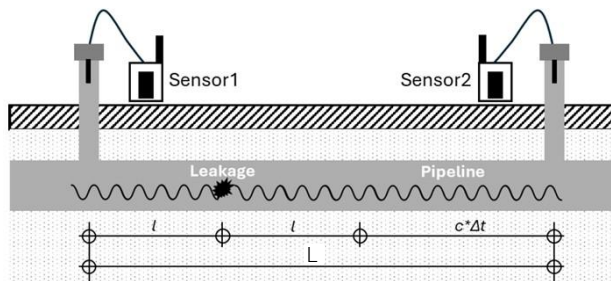
กระบวนการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบไขว้ (Cross-Correlation Analysis) เป็นกระบวนการประมวลผลสัญญาณที่ใช้ในการวัดความคล้ายคลึงกันของสัญญาณสองชุด วิธีนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งการรั่วไหลเนื่องจากการรั่วจะทำให้เกิดสัญญาณเสียง (Leak Noise) เสียงการรั่วไหลจะมีย่านความถี่และรูปแบบที่เป็นเอกลักษณ์ซึ่งได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความดันน้ำ ขนาดของท่อ และวัสดุของท่อ [9-12] เมื่อเกิดจุดรั่วไหลในตำแหน่งระหว่างเซ็นเซอร์สองตัวที่ต่อกับเครื่องส่งสัญญาณเสียง (Transmitters) โดยเซนเซอร์ทั้งสองจะสามารถตรวจจับสัญญาณ และส่งสัญญาณไปที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเสียง (Prime Touch) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะความถี่และรูปแบบคล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันในเรื่องของเวลาสามารถตรวจวัดได้ โดยใช้กระบวนการ Cross-Correlation จะคำนวณหาเวลาที่ต่างกันที่เสียงใช้เดินทางไปถึงทั้งสองเซนเซอร์ โดยที่สัญญาณจากเซนเซอร์ตัวหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นข้อมูลอ้างอิง ในขณะที่สัญญาณจากอีกเซนเซอร์จะถูกเลื่อนเวลาไปตามขั้นเวลา (Time-lag, Δt)

(ช่วงเวลาแต่ละขั้นจะถูกกำหนดโดยอัตราการสุ่มตัวอย่างของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเสียง) ค่า Cross-Correlation สูงสุดจะแสดงถึงความคล้ายคลึงกันสูงสุดของสัญญาณเสียง ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ Time-lag ที่เฉพาะเจาะจง โดยค่า Cross-Correlation: $R(\tau)$ สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ 1

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X_1(t) * X_2(t-\tau) dt \quad (1)$$

โดย $X_1(t)$ หมายถึง สัญญาณเสียงที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงในโดเมนของเวลา, $X_2(t)$ หมายถึง สัญญาณเสียงที่ถูกเลื่อนเวลาไปตามขั้นเวลาในโดเมนของเวลา และ τ หมายถึง ขั้นเวลา Time-lag ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งบวก ลบ และ ศูนย์

โดย ณ ขั้นเวลา Time-lag ที่ให้ค่า $R(\tau)$ สูงที่สุดแสดงถึงความแตกต่างของเวลาที่เสียงรั่วใช้ในการเดินทางผ่านน้ำในท่อไปยังเครื่องส่งสัญญาณทั้งสอง ดังนั้นสามารถนำค่า Δt มาใช้ในการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสองเซนเซอร์และจุดรั่วดังแสดงในรูปที่ 4 และได้ตำแหน่งจุดรั่วไหลดังแสดงในสมการที่ 2 หรือ 3



รูปที่ 4 ระยะห่างระหว่างสองเซนเซอร์และจุดรั่ว

$$l = \frac{L - c(\Delta t)}{2} \quad (2)$$

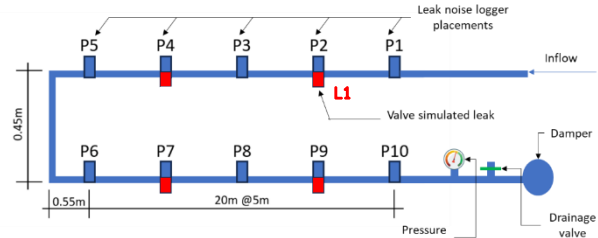
โดย l หมายถึง ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์อ้างอิง ถึง จุดรั่ว, L หมายถึง ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ 1 และ เซนเซอร์ 2 และ c หมายถึง ความเร็วของเสียงในท่อ [13-14]

$$\Delta l = l - l_r = \frac{-\Delta c(\Delta t)}{2} \quad (3)$$

โดย Δl หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อน, l_r หมายถึง ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์อ้างอิงถึงจุดรั่วที่ถูกต้อง และ Δc หมายถึง ผลต่างระหว่าง c และความเร็วเสียงที่ถูกต้อง (c_r)

2.3 ระบบท่อทางเดียวจำลองบนผิวดินในห้องปฏิบัติการ

เพื่อวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งจุดรั่วโดยใช้เทคนิคแบบไม่รุกล้ำที่ใช้มาตรความเร่ง และแบบรุกล้ำที่ใช้ไฮโดรโฟน การศึกษานี้ได้สร้างระบบท่อทางเดียวจำลองบนผิวดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งจุดรั่วและระยะห่างของเซนเซอร์ที่แท้จริง โดยมีรายละเอียดของระบบดังแสดงในรูปที่ 5 และตารางที่ 2



รูปที่ 5 แผนผังระบบท่อทางเดียวจำลองบนผิวดินในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2 รายละเอียดของระบบท่อทางเดียวจำลองบนผิวดินในห้องปฏิบัติการ

รายการ	จำนวน	หน่วย
ความยาวท่อ PVC ขนาด 25 มิลลิเมตร	42.80	เมตร
จุดติดตั้งเซนเซอร์	10	จุด
วาล์วทองเหลืองจำลองการรั่ว	4	จุด
ถังลดเสียงสะท้อน	1	ถัง
มาตรวัดแรงดัน	1	จุด
ความดันเฉลี่ยภายในระบบ	29	เมตร

2.4 เครื่องมือตรวจจับรอยรั่ว

การศึกษานี้ใช้เครื่องมือตรวจจับรอยรั่วรุ่น Eureka3 ซึ่งใช้หลักการวิเคราะห์สเปกตรัมแบบไขว้เพื่อหาค่า Δt แล้วนำมาใช้คำนวณตำแหน่งจุดรั่วไหลจากสมการที่ 2 โดยมีอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 6



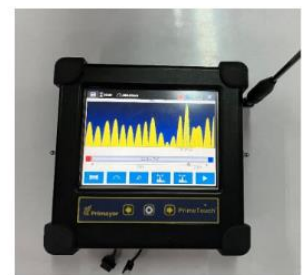
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ข)

รูปที่ 6 (ก) มาตรการความเร่ง (Accelerometers)

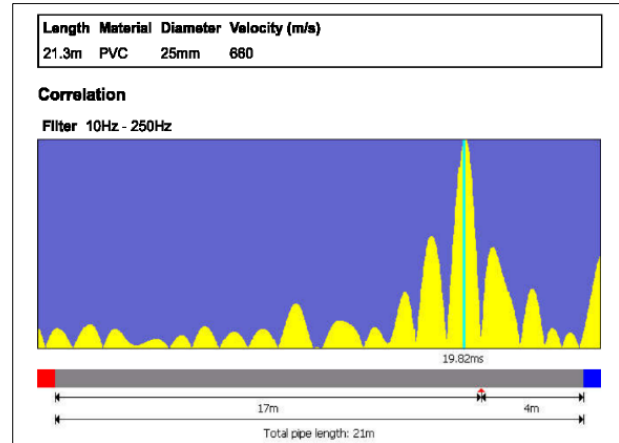
(ข) ไฮโดรโฟน (Hydrophones) (ค) เครื่องส่งสัญญาณเสียง (Transmitters)

(ง) เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเสียง (Prime Touch) (จ,ข) ตัวอย่างการต่ออุปกรณ์

2.5 ขั้นตอนการทดลอง

การศึกษานี้ทดลองจุดรั่วไหล 1 จุด โดยจำลอง 3 อัตราการรั่วไหล ได้แก่ อัตราการรั่วไหลสูง (Q_H) วัดอัตราการไหลได้ 11.88 ลิตรต่อนาที อัตราการรั่วไหลปานกลาง (Q_M) วัดอัตราการไหลได้ 5.52 ลิตรต่อนาที และอัตราการรั่วไหลต่ำ (Q_L) วัดอัตราการไหลได้ 0.54 ลิตรต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งจุดรั่วไหล 2 เทคนิค ได้แก่ แบบไม่รุกล้ำที่ใช้มาตรการความเร่งและแบบรุกล้ำที่ใช้ไฮโดรโฟน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

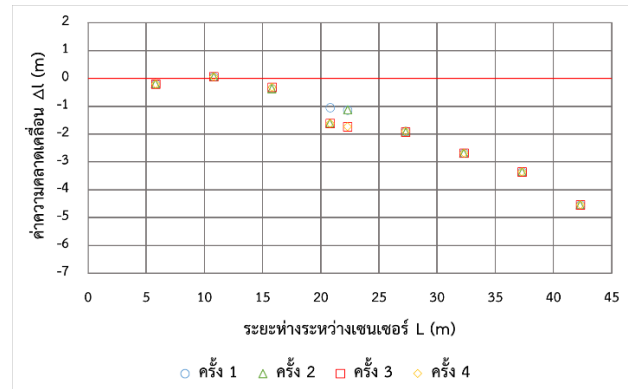
- 1) อัดลมเข้าไปในถังลดเสียงสะท้อน ซึ่งเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่อาจส่งผลต่อความแม่นยำในการตรวจจับเสียงรั่ว
- 2) เปิดน้ำเข้าสู่ระบบและไล่อากาศออก เพื่อให้แน่ใจว่าระบบไม่มีฟองอากาศที่อาจรบกวนการเดินทางของคลื่นเสียง และบันทึกค่าความดันที่เกจวัดแรงดันเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง
- 3) ทำการเปิดน้ำที่ตำแหน่ง L1 เพื่อจำลองรอยรั่วในระบบ จากนั้นวัดอัตราการไหลของน้ำรั่ว
- 4) ติดตั้งเซ็นเซอร์ที่ต่อกับตัวส่งสัญญาณ (สัญญาณ) ที่ตำแหน่ง P1 และติดตั้งเซ็นเซอร์ที่ต่อกับตัวส่งสัญญาณ (สีแดง) ที่ตำแหน่ง P2
- 5) บันทึกค่าระยะจุดรั่วจริง โดยวัดระหว่างเซ็นเซอร์ที่ต่อกับตัวส่งสัญญาณ (สัญญาณ) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์อ้างอิงที่ตำแหน่ง P1 ถึง L1 และระยะห่างระหว่าง 2 เซ็นเซอร์ (L)
- 6) เปิดใช้งานเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (PrimeTouch) และตั้งค่าพารามิเตอร์เบื้องต้น ได้แก่ ชนิดท่อเป็น PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และ L ตามค่าที่วัดได้ โดยเครื่องจะประเมินค่า c เท่ากับ 660 เมตรต่อวินาที เพื่อคำนวณช่วงเวลาหน่วงของเสียง (Δt) และนำค่า Δt มาคำนวณหาระยะตำแหน่งจุดรั่วดังแสดงในสมการที่ 2 ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์จะแสดงรายงานดังแสดงในรูปที่ 7 โดยมีการดำเนินการคำนวณจำนวน 4 ครั้ง
- 7) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5 และ 6 โดยเปลี่ยนตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่ต่อกับตัวส่งสัญญาณ (สีแดง) ไปยังตำแหน่งถัดไป ได้แก่ P3 ถึง P10 ขณะที่เซ็นเซอร์ที่ต่อกับตัวส่งสัญญาณ (สัญญาณ) คงไว้ที่ P1
- 8) เปลี่ยนอัตราการไหลถัดไป แล้วทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 จนครบทั้ง 3 ระดับ



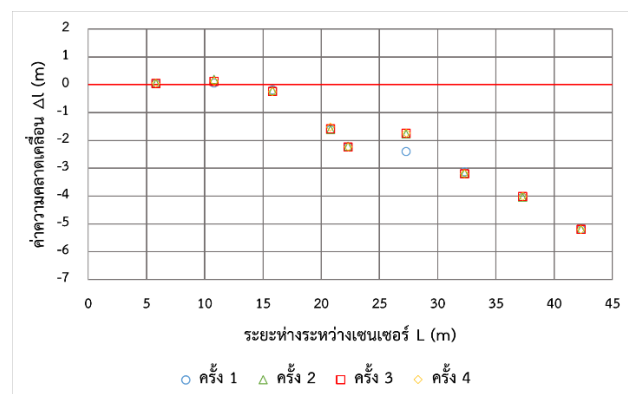
รูปที่ 7 ตัวอย่างรายงานผลของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (PrimeTouch)

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

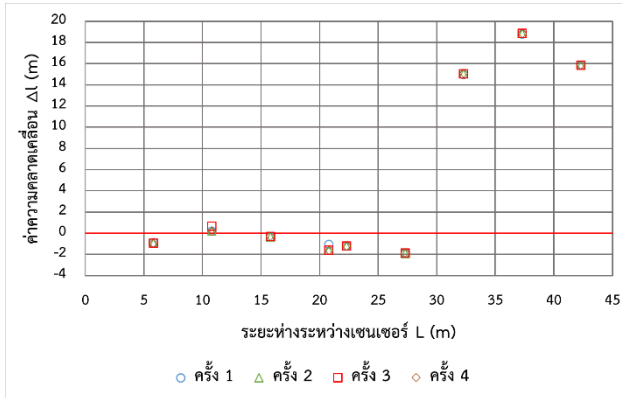
จากเครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณจะได้ค่า Δt ของแต่ละอัตราการไหล โดยเครื่องได้ประเมินค่า c เท่ากับ 660 เมตรต่อวินาที และนำผลค่า Δt ของแต่ละอัตราการรั่วไหลมาคำนวณค่า L และนำค่า L ลบค่า L_s ซึ่งมีค่าเท่ากับเท่ากับ 5.26 เมตร และ 5.47 เมตร ของมาตรการความเร่งและไฮโดรโฟนตามลำดับ จะได้ ΔL ดังแสดงในรูปที่ 8



(ก) กรณี $Q_H = 11.88$ L/min และ $c = 660$ m/s



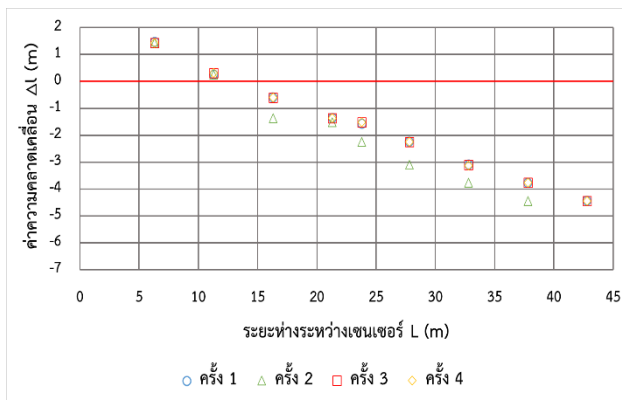
(ข) กรณี $Q_M = 5.52$ L/min และ $c = 660$ m/s



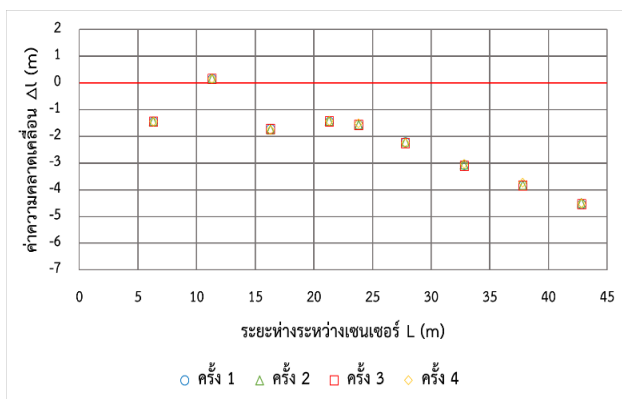
(ค) กรณี $Q_L = 0.54$ L/min และ $c = 660$ m/s

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔL และ L โดยกรณี Q_H, Q_M, Q_L และ $c=660$ m/s ของ Accelerometers

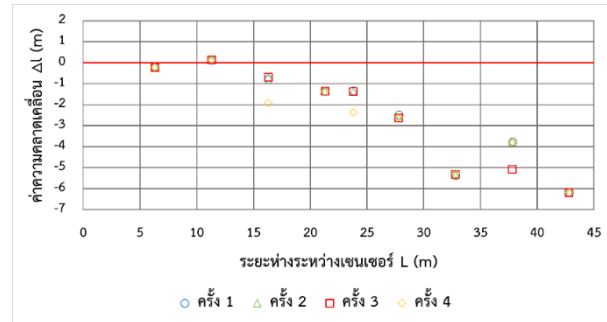
จากรูปที่ 8 พบว่า L เพิ่มขึ้น ΔL มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจุดรั่วไหลลดลง อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ระยะห่างของเซ็นเซอร์อยู่ที่ตำแหน่ง P1 และ P3 ซึ่งจุดรั่วไหลอยู่กึ่งกลางระหว่างเซ็นเซอร์ทั้งสอง พบว่าค่า ΔL ต่ำที่สุด จึงมีความแม่นยำสูงสุด เนื่องจากค่า Δt มีค่าต่ำ ทำให้การคำนวณ L มีความถูกต้องมากขึ้น



(ก) กรณี $Q_H = 11.88$ L/min และ $c = 660$ m/s



(ข) กรณี $Q_M = 5.52$ L/min และ $c = 660$ m/s



(ค) กรณี $Q_L = 0.54$ L/min และ $c = 660$ m/s

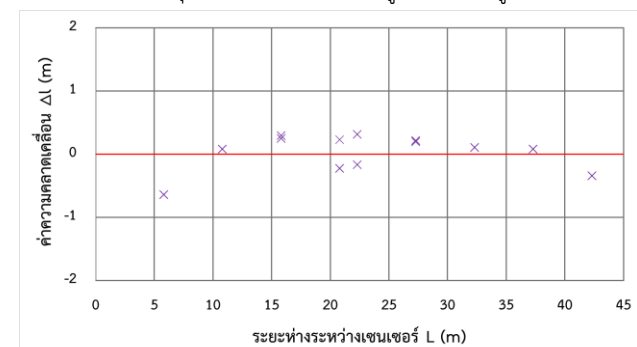
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔL และ L โดยกรณี Q_H, Q_M, Q_L และ $c=660$ m/s ของ Hydrophones

จากรูปที่ 8 (ค) พบว่า ในกรณีที่ระยะห่างของเซ็นเซอร์อยู่ระหว่างตำแหน่ง P1 ถึง P8, P9 และ P10 ค่า ΔL มีค่าสูง ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการรั่วไหลที่ต่ำ ทำให้แรงสั่นสะเทือนจากเสียงที่เกิดขึ้นบนผิวท่อมีค่าต่ำ จนไม่สามารถตรวจจับได้ด้วยมาตรฐานความเร่งได้

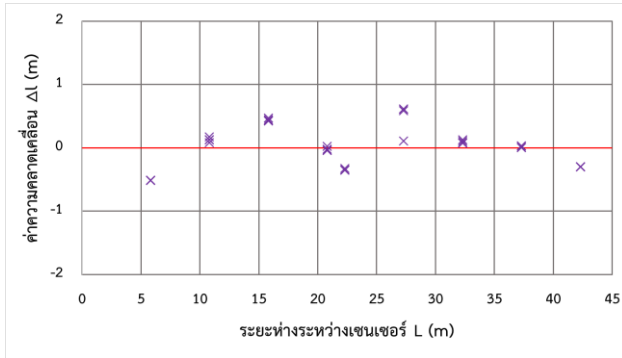
จากรูปที่ 9 พบว่า L เพิ่มขึ้น ΔL มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจุดรั่วไหลลดลง อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่เซ็นเซอร์อยู่ที่ตำแหน่ง P1 และ P3 ซึ่งจุดรั่วไหลอยู่บริเวณกึ่งกลางของระยะ L พบว่าค่า ΔL ต่ำที่สุด จึงมีความแม่นยำสูงสุด เนื่องจากค่า Δt มีค่าต่ำ ทำให้การคำนวณ L มีความถูกต้องมากขึ้น โดยแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบมาตรฐานความเร่ง

จากรูปที่ 8 (ค) และ รูปที่ 9 (ค) พบว่า เมื่อระยะห่างของเซ็นเซอร์อยู่ระหว่างตำแหน่ง P1 ถึง P8, P9 และ P10 ค่า ΔL ที่ได้จากไฮโดรโฟนต่ำกว่ามาตรฐานความเร่งอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่จุดรั่วไหลมีอัตราการรั่วไหลต่ำ ไฮโดรโฟนมีประสิทธิภาพในการตรวจจับตำแหน่งรอยรั่วได้ดีกว่ามาตรฐานความเร่ง และผลลัพธ์ดังกล่าวเป็นไปในทางเดียวกับความบทความที่ใช้ไฮโดรโฟนในการระบุจุดรั่วไหลที่สรุปว่าการวัดเสียงภายในท่อมักมีคุณภาพสูงในการตรวจจับรอยรั่ว [15]

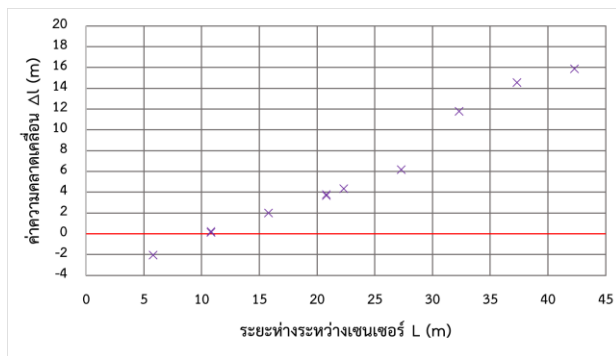
จากรูปที่ 8 และรูปที่ 9 พบว่าในทุกกรณี ค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในรูปแบบเชิงเส้นตรง ยกเว้นกรณีของรูปที่ 8 (ค) ซึ่งอาจเกิดจากค่าความเร็วเสียงที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณประเมินไว้ไม่สอดคล้องกับค่าจริง ดังที่แสดงในสมการที่ 3 ทั้งนี้ เมื่อดำเนินการปรับค่า c โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ของโปรแกรม Excel เพื่อค้นหาค่าที่ทำให้ Root Mean Square Error (RMSE) ต่ำที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 10 และรูปที่ 11



(ก) X คือ กรณี $Q_H = 11.88$ L/min และ $c = 524.36$ m/s

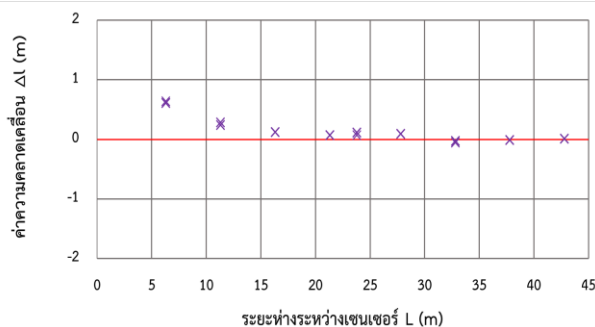


(ข) X คือ กรณี $Q_M = 5.52$ L/min และ $c = 506.40$ m/s

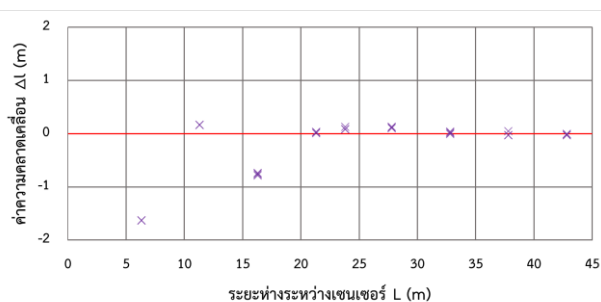


(ค) X คือ กรณี $Q_L = 0.54$ L/min และ $c = 141.91$ m/s

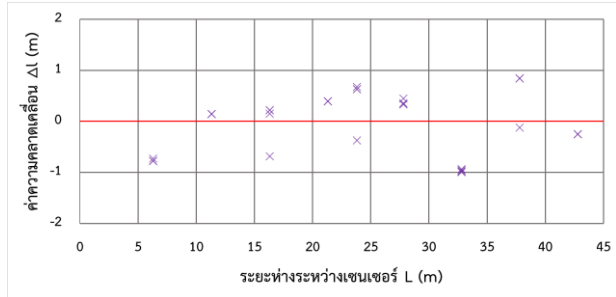
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔL และ L โดยกรณี Q_H , Q_M , Q_L และ $c=524.36$ m/s, 506.40 m/s, 141.91 m/s ของมาตรการความเร่ง



(ก) X คือ กรณี $Q_H = 11.88$ L/min และ $c = 515.70$ m/s



(ข) X คือ กรณี $Q_M = 5.52$ L/min และ $c = 514.77$ m/s



(ค) X คือ กรณี $Q_L = 0.54$ L/min และ $c = 483.07$ m/s

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔL และ L โดยกรณี Q_H , Q_M , Q_L และ $c=515.70$ m/s, 514.77 m/s, 483.07 m/s ของไฮโดรโฟน

จากรูปที่ 10 (ก) และ (ข) เมื่อปรับค่า c เท่ากับ 524.36 เมตรต่อวินาที และ 506.40 เมตรต่อวินาที ที่ Q_H และ Q_M จะได้ค่า RMSE ต่ำสุดของมาตรการความเร่งจาก 2.29 เมตร และ 2.68 เมตร เหลือ 0.29 เมตร และ 0.33 เมตร ตามลำดับ จะได้ ΔL น้อยมาก แต่จากรูปที่ 10 (ค) เมื่อปรับค่า c เท่ากับ 141.91 เมตรต่อวินาที ที่ Q_L จะได้ค่า RMSE ต่ำสุดของมาตรการความเร่งจาก 9.67 เมตร เหลือ 8.71 เมตร ซึ่งค่า RMSE ลดลงน้อย เนื่องจากค่า ΔL มีความแตกต่างกันมาก

จากรูปที่ 11 เมื่อปรับค่า c เท่ากับ 515.70 เมตรต่อวินาที, 514.77 เมตรต่อวินาที และ 483.07 เมตรต่อวินาที ที่ Q_H , Q_M และ Q_L จะได้ค่า RMSE ต่ำสุดของไฮโดรโฟนจาก 2.48 เมตร, 2.55 เมตร และ 3.27 เมตร เหลือ 0.23 m, 0.60 m และ 0.57 m ตามลำดับ แสดงว่าค่า c มีนัยสำคัญต่อการระบุตำแหน่งการรั่วไหลอย่างมาก

4. สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งจุดรั่วไหลด้วยเทคนิคแบบไม่รุกล้ำโดยใช้มาตรการความเร่งและแบบรุกล้ำโดยใช้ไฮโดรโฟน สรุปได้ดังนี้

- 1) เมื่อระยะห่างระหว่าง 2 เซ็นเซอร์ (L) มีค่าเพิ่มขึ้น ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจุดรั่วมีแนวโน้มลดลง แต่ถ้าหากจุดรั่วอยู่บริเวณกึ่งกลางระหว่าง 2 เซ็นเซอร์ ความแม่นยำจะสูงขึ้นเนื่องจากช่วงเวลากว้างของเสียงรั่ว (Δt) มีค่าน้อย
- 2) ในกรณีจุดรั่วมีอัตราการรั่วไหลต่ำไฮโดรโฟนมีประสิทธิภาพในการตรวจจับตำแหน่งรอยรั่วได้ดีกว่ามาตรการความเร่ง
- 3) ค่าความเร็วเสียงในท่อ (c) ที่คลาดเคลื่อนจะส่งผลให้ตำแหน่งจุดรั่วคลาดเคลื่อนด้วย โดยเครื่องมือได้ประเมินค่า c เท่ากับ 660 เมตรต่อวินาที แต่หากทดลองปรับค่า c โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ของโปรแกรม Excel เพื่อหาค่าที่เหมาะสม โดยกำหนดค่า Root Mean Square Error (RMSE) ต่ำสุด จะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 3

จากผลการทดลองสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจเลือกเทคนิคแบบรุกล้ำที่ใช้ไฮโดรโฟนสำหรับกรณีจุดรั่วมีอัตราการรั่วไหลต่ำ ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งจุดรั่วได้ดีกว่าเทคนิคแบบไม่รุกล้ำที่ใช้มาตรการความเร่ง นอกจากนี้ ผลการทดลองสามารถนำไปต่อยอดในการ

พัฒนาฟังก์ชันคำนวณค่า c ที่เหมาะสม เพื่อยกระดับความแม่นยำของระบบตรวจจับจุดรั่วในโครงข่ายท่อจ่ายน้ำได้อย่างเป็นรูปธรรมต่อไป

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองกับระบบท่อทางเดียวจำลองบนผิวดินภายในห้องปฏิบัติการ โดยเป็นท่อชนิด PVC ขนาด 25 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถตรวจสอบและวัดผลได้อย่างเป็นระบบ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังไม่ได้พิจารณาอิทธิพลของปัจจัยอื่น ๆ เช่น ชนิดท่อ ขนาดท่อ ความดันในท่อ และลักษณะของรอยรั่วที่เปลี่ยนแปลง รวมถึงไม่ได้ดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมจริงของระบบท่อประปาภาคสนามซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่า ดังนั้น ผลการทดลองที่ได้จึงสะท้อนประสิทธิภาพของเทคนิคภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมได้เท่านั้น ทั้งนี้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ และดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมจริง เพื่อประเมินความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของระบบในเชิงปฏิบัติการต่อไป

ตารางที่ 3 ค่า RMSE ก่อนปรับและหลังปรับ c ที่ Q_H, Q_M และ Q_L ของมาตรความเร่งและไฮโดรโฟน

ประเภท	อัตราการไหล (L/min)	RMSE (m) ก่อนปรับ c (m/s)	RMSE (m) หลังปรับ c (m/s)
เทคนิคแบบไม่รุกราน ที่ใช้มาตรความเร่ง (Non- intrusive technique using accelerometers)	$Q_H = 11.88$	2.29 ($c=660$)	0.29 ($c=524.36$)
	$Q_M = 5.52$	2.68 ($c=660$)	0.33 ($c=506.40$)
	$Q_L = 0.54$	9.67 ($c=660$)	8.71 ($c=141.91$)
	ค่าเฉลี่ย	4.88 ($c=660$)	3.11 ($c=390.89$)
เทคนิคแบบรุกราน ที่ใช้ไฮโดรโฟน (Intrusive technique using hydrophones)	$Q_H = 11.88$	2.48 ($c=660$)	0.23 ($c=515.70$)
	$Q_M = 5.52$	2.55 ($c=660$)	0.60 ($c=514.77$)
	$Q_L = 0.54$	3.27 ($c=660$)	0.57 ($c=483.07$)
	ค่าเฉลี่ย	2.76 ($c=660$)	0.46 ($c=504.51$)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bonaiti, G., and G. Fipps. (2016). Methodology for quantifying impacts of urbanization on the water distribution networks of irrigation districts. *Agric. Water Manage*, 176, (Oct): 270-279
- [2] Zaman, D., A. K. Gupta, V. Uddameri, M. K. Tiwari, and D. Sen. (2022). Exploring the key facets of leakage dynamics in water distribution networks: Experimental verification, hydraulic modeling, and sensitivity analysis. *J. Cleaner Prod*, 362, (Aug): 132236.
- [3] การประปาส่วนภูมิภาค. (2562-2567). รายงานประจำปี 2562-2567 (ผลการดำเนินโครงการ). การประปาส่วนภูมิภาค.
- [4] การประปานครหลวง. (2562-2567). รายงานประจำปี 2562-2567 (ผลการดำเนินโครงการ). การประปานครหลวง.
- [5] Alegre, H., Baptista, J. F., Jr, C., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., & Parena, R. (2000). Performance Indicators for Water Supply Services. In.
- [6] Wu, Z. Y., Farley, M., Turtle, D., Kapelan, Z., Boxall, J., Mounce, S., Dahasahasra, S., Mulay, M., & Kleiner, Y. (2011). *Water Loss Reduction*. Bentley Institute Press.
- [7] Hamilton, S., & Charalambous, B. (2020). *Leak Detection: Technology and Implementation*. IWA Publishing.
- [8] Hamilton, S., Charalambous, B., & Wyeth, G. (2021). *Improving Water Supply Networks: Fit for Purpose Strategies and Technologies*. IWA Publishing
- [9] Scussel, O., Brennan, M. J., Almeida, F. C. L., Muggleton, J. M., Rustighi, E., & Joseph, P. F. (2021). Estimating the spectrum of leak noise in buried plastic water distribution pipes using acoustic or vibration measurements remote from the leak. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107059.
- [10] Muggleton, J. M., Brennan, M. J., & Pinnington, R. J. (2002). WAVENUMBER PREDICTION OF WAVES IN BURIED PIPES FOR WATER LEAK DETECTION. *Journal of Sound and Vibration*, 249(5), 939-954.
- [11] Brennan, M. J., Gao, Y., Ayala, P. C., Almeida, F. C. L., Joseph, P. F., & Paschoalini, A. T. (2019). Amplitude distortion of measured leak noise signals caused by instrumentation: Effects on leak detection in water pipes using the cross-correlation method. *Journal of Sound and Vibration*, 461, 114905
- [12] Chantarachote, R., Charuwimolkul, N., Jaikaeo, C., & Pornprommin, A. (2024, 19-22 June 2024). Leak Signal Collection and Classification in Water Pipelines Using Resource-Constrained Devices. 2024 21st International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE),
- [13] Hunaidi, O., Chu, W., Wang, A., & Guan, W. (2000). Detecting leaks in plastic pipes. *Journal AWWA*, 92(2), 82-94
- [14] Gao, Y., Brennan, M. J., Joseph, P. F., Muggleton, J. M., & Hunaidi, O. (2004). A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes. *Journal of Sound and Vibration*, 277(1), 133-148.
- [15] Khulief, Y., Khalifa, A., Ben-Mansour, R., & Habib, M. A. (2012). Acoustic Detection of Leaks in Water Pipelines Using Measurements inside Pipe. *ASCE JOURNAL OF PIPELINE SYSTEMS ENGINEERING AND PRACTICE*, 3, 475