

การตรวจวัดความลึกการไหลและระดับผิวน้ำในรางน้ำเปิด ด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิกหลายตำแหน่งพร้อมกัน Simultaneous Measurement of Flow Depth and Water Surface Elevation in a Flume Using Multi-Point Ultrasonic Sensors

อนุศิษฐ์ ด้วงสอ^{1,*} ขวัญชัย แพบโคสูง² และ อนุรักษ ศรีอริยวัฒน์¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

*Corresponding author; E-mail address: Anusitcons@gmail.com

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปการตรวจวัดความลึกการไหลและระดับของผิวน้ำขณะทำการทดลองในรางน้ำเปิด (flume) ภายในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ มักจะใช้เครื่องมืออุปกรณ์ตรวจวัดแบบดั้งเดิม เช่น ไม้วัดความลึก หรือเกจวัดความลึก (depth gauge) ในการทดลองการไหลแบบไม่คงที่ (unsteady flow) บางกรณีศึกษาที่มีความจำเป็นจะต้องเก็บข้อมูลพร้อมกันหลายตำแหน่ง ณ เวลาเดียวกัน จึงจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือหลายตำแหน่ง และต้องมีผู้ปฏิบัติงานหลายคนดำเนินการวัดข้อมูลพร้อมกัน การศึกษานี้มีเป้าหมายที่จะนำเสนอการศึกษาเทคนิคการวัดระดับน้ำ โดยใช้การผสมผสานระหว่างอุปกรณ์เซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic sensor) กับบอร์ดอาร์ดูইโน (Arduino board) และเพิ่มเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เพื่อให้ค่าวัดที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น ด้วยระบบนี้สามารถตรวจวัดค่าความลึกการไหลและค่าระดับผิวน้ำหลายตำแหน่งพร้อมกัน ณ เวลาเดียวกันได้ โดยข้อมูลในการตรวจวัดจากระบบอุปกรณ์เซนเซอร์อัลตราโซนิกได้ถูกตรวจสอบกับการวัดโดยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมเพื่อหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในทดลองครั้งนี้ โดยหวังว่าผลการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้เทคนิคนี้กับการทดลองในรางน้ำเปิดรูปแบบอื่นๆต่อไปได้อีกในอนาคต

คำสำคัญ: เซนเซอร์อัลตราโซนิก, บอร์ดอาร์ดูইโน, รางน้ำเปิด, ความลึกการไหล

Abstract

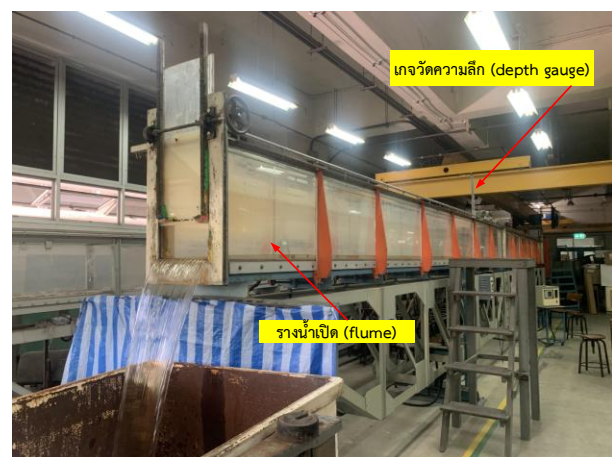
Generally, flow depth and water surface elevation are measured during flume experiments conducted in the hydraulics laboratory. Traditional measuring tools such as depth measuring sticks or depth gauges are often used. For some unsteady flow experiments, it required to collect data simultaneously in many locations. This required to install many measuring equipment, and many technicians were requested to measure at the same time. This study aims to present a study on water elevation measurement techniques by integrating ultrasonic sensors with an Arduino board, enhanced by adding temperature and humidity sensors to improve measurement accuracy. This system enables to measure the flow depth and the water surface elevation among multiple locations simultaneously. Additionally, the measurement data obtained from the ultrasonic sensor system was compared to traditional methods to evaluate the measurement discrepancies. It is

hoped that the results of this study will be useful for applying this technique to other type of open channel flume experiments in the future.

Keywords: Ultrasonic sensor, Arduino board, flume, flow depth

1. บทนำ

ปัญหาในการตรวจวัดความลึกและระดับผิวน้ำในรางน้ำเปิด (flume) ภายในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ขณะทำการทดลอง ส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาการตรวจวัดด้วยแรงงานคนและใช้อุปกรณ์แบบดั้งเดิม เช่น ไม้วัดความลึก หรือเกจวัดความลึก (depth gauge) เป็นหลัก กระบวนการดังกล่าวต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลในแต่ละครั้งค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำเป็นต้องเก็บข้อมูลในหลายตำแหน่งตลอดแนวรางน้ำ เนื่องจากรางน้ำเปิดที่ใช้ในการทดลองมักมีความยาวมาก ดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้ การใช้เครื่องมือวัดแบบดั้งเดิมจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ในหลายตำแหน่ง ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการทดลองแต่ละครั้งเพิ่มขึ้น อีกทั้งหากเป็นการทดลองการไหลแบบไม่คงที่ (unsteady flow) ซึ่งในบางกรณีจำเป็นต้องเก็บข้อมูลจากหลายตำแหน่งพร้อมกัน ณ เวลาเดียวกัน ก็ยังต้องใช้อุปกรณ์จำนวนมากและต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงานหลายคนในการดำเนินการวัด ส่งผลให้กระบวนการทดลองมีความยุ่งยากและใช้เวลานานยิ่งขึ้น

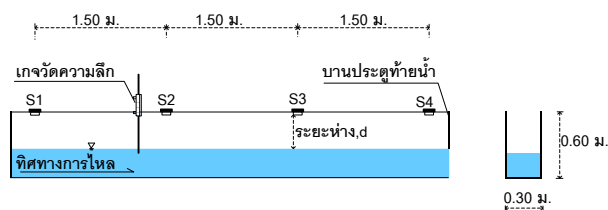


รูปที่ 1 รางน้ำเปิด (flume) และเกจวัดความลึก (depth gauge)

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic sensor) และไมโครคอนโทรลเลอร์ต่าง ๆ เช่น บอร์ดอาร์ดูইโน (Arduino board) [1] อย่างแพร่หลาย เนื่องจากการใช้งานที่ง่าย

เหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา โดยไม่จำเป็นต้องมีความรู้ด้านการต่อวงจรที่ซับซ้อน การเขียนโปรแกรมสามารถทำได้ด้วยภาษา C หรือ C++ ซึ่งเข้าใจง่าย พร้อมทั้งมีตัวอย่างโค้ดและโปรเจกต์จำนวนมากให้ศึกษา บอร์ดทดลองมีราคาไม่แพงและมีให้เลือกหลากหลายตามความเหมาะสม พร้อมทั้งมีอุปกรณ์เสริมรองรับเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ แพลตฟอร์มอาร์ดูโน้ ยังเป็นแบบ Open Source สามารถใช้งานได้ฟรี และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม หรือพัฒนาทั้งตัวบอร์ดและโปรแกรมได้ตามต้องการ ตัวอย่างเช่น การพัฒนาเป็นอุปกรณ์วัดความสูงของบุคคลแบบดิจิทัล [2] ซึ่งสามารถวัดค่าความสูงได้ตั้งแต่ 130-167 ซม. โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 1.0% อีกทั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกยังถูกนำมาใช้งานในด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดและบริหารจัดการข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระดับน้ำและการไหลของน้ำ เช่น การพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับวัดระดับน้ำในบ่อปลา [3] โดยเชื่อมต่อเซนเซอร์อัลตราโซนิกกับไมโครคอนโทรลเลอร์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE Notify พบว่าสามารถตรวจวัดระดับน้ำและแจ้งการแจ้งเตือนได้อย่างถูกต้องทุกครั้งที่การทดลองจำนวน 20 ครั้ง ช่วยลดปัญหาการลื่นปิดน้ำหลังการใช้งาน และสามารถแจ้งเตือนเมื่อมีการรั่วไหลของน้ำภายในบ้านผ่านแอปพลิเคชัน LINE เมื่อไม่มีผู้อยู่อาศัยในบ้านได้ รวมทั้งยังมีการนำมาวิจัยพัฒนาเป็นเครื่องวัดระดับน้ำที่แจ้งเตือนผ่านข้อความสั้น (SMS) สำหรับอ่างเก็บน้ำขนาดเล็ก โดยมีค่าความผิดพลาดในการวัดเฉลี่ยเพียง 0.27% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานจริงในงานวัดระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำขนาดเล็ก [4]

ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้นำเสนอการทดลองและเปรียบเทียบการใช้งานเซนเซอร์อัลตราโซนิกกับเครื่องมือวัดแบบดั้งเดิม ได้แก่ เกจวัดความลึก โดยทำการตรวจวัดค่าความลึกการไหลและระดับผิวน้ำในรางน้ำเปิด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ จำนวน 4 ตำแหน่งพร้อมกันในเวลาเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2 วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาคือ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์อัลตราโซนิกในการตรวจวัดค่าความลึกการไหลและระดับของผิวน้ำ โดยข้อมูลที่ได้จากระบบเซนเซอร์อัลตราโซนิกจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเกจวัดความลึก เพื่อประเมินความแม่นยำและความเหมาะสมของเซนเซอร์สำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์



รูปที่ 2 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์อัลตราโซนิกกับรางน้ำเปิด

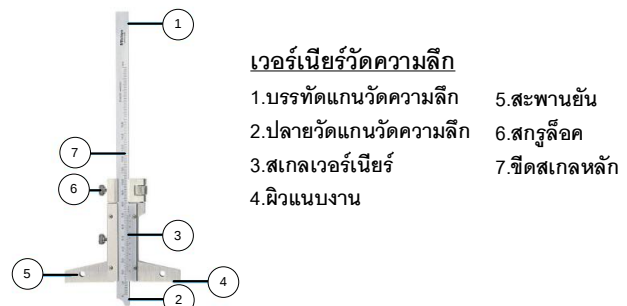
2. การดำเนินการศึกษา

2.1 การวัดความลึกการไหลโดยใช้เกจวัดความลึก (depth gauge)

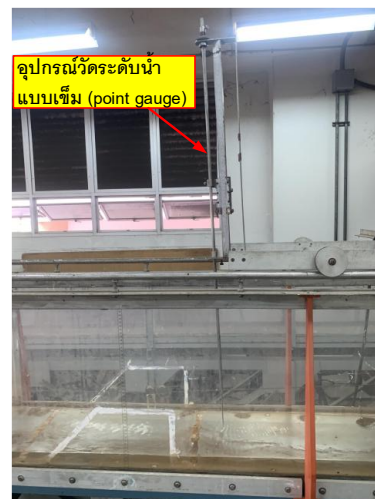
อุปกรณ์ตรวจวัดแบบดั้งเดิมที่จะกล่าวถึงในที่นี้ คือเกจวัดความลึกชนิดเวอร์เนีย (Vernier Depth Gauge) [5] แบบอนาล็อก (Analog) ซึ่งมีความละเอียด 0.02 มม. เป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้สเกลเวอร์เนียในการอ่านค่า ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) ลักษณะการใช้งานคล้ายกับเวอร์เนียคาลิเปอร์ แต่แตกต่างกันตรงที่เวอร์เนียวัดความลึกจะมีสเกลหลักเลื่อนขึ้น-ลงผ่านฐาน สำหรับเกจวัดความลึกที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ มีการดัดแปลงเพิ่มเติม โดยให้สเกลเวอร์เนียเป็นตัวเลื่อนขึ้น-ลง และติดตั้งเสริม

อุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบเข็ม (point gauge) เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถอ่านค่าความลึกจากสเกลเวอร์เนียได้สะดวกและแม่นยำยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข)

การวัดความลึกของน้ำ จะทำการติดตั้งเวอร์เนียวัดความลึกที่ขอบบนของรางน้ำเปิด เหนือผิวน้ำ จากนั้นหย่อนอุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบเข็มลงไปจนถึงท้องน้ำ แล้วล็อกอุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบเข็มเข้ากับสเกลเวอร์เนีย จากนั้นทำการล็อกสเกลของสเกลเวอร์เนียเพื่อเช็ตศูนย์ที่ขีดสเกลหลัก เมื่อเช็ตศูนย์เสร็จแล้ว ให้ปลดล็อกสเกลเวอร์เนีย แล้วหย่อนอุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบเข็มลงจนสัมผัสกับผิวน้ำ จากนั้นอ่านค่าจากขีดสเกลหลัก ซึ่งจะได้ค่าความลึกของการไหล



(ก) เกจวัดความลึกชนิดเวอร์เนีย (Vernier Depth Gauge) [5]



(ข) ติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบเข็ม (point gauge)

รูปที่ 3 เกจวัดความลึก (depth gauge) ในรูปแบบของเวอร์เนียวัดความลึก (Vernier depth gauges) [5]

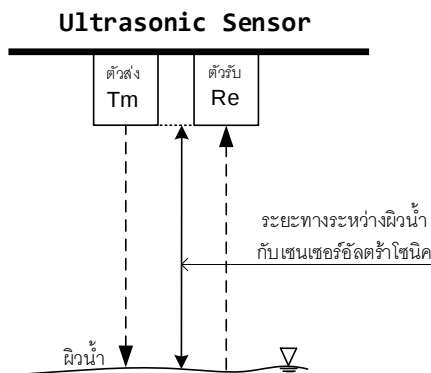
2.2 การวัดการวัดความลึกการไหลโดยใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิก (ultrasonic sensor)

ในการศึกษานี้เลือกใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น HC-SR04 [6] แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดระยะทางโดยอาศัยคลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic) ที่มีความแม่นยำสูง ราคาไม่แพง ใช้งานง่าย และสามารถใช้งานร่วมกับบอร์ดอาร์ดูโน้ได้ทุกรุ่น หลักการทำงานของเซนเซอร์อัลตราโซนิก คือ การส่งคลื่นเสียงความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน ออกไปกระทบวัตถุและสะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณ จากนั้นทำการคำนวณระยะทางโดยมีช่วงวัดระยะตั้งแต่ 0.20 ม. ถึง 4.00 ม. ด้วยความแม่นยำ 0.003 ม.

และมุมเปิด 30° ตัวเซนเซอร์ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ตัวส่งสัญญาณ (Trig/Transmit) และตัวรับสัญญาณ (Echo/Receiver) โดยตัวส่งจะปล่อยคลื่นเสียงไปกระทบพื้นผิวใดๆในที่นี้คือ ผิวน้ำ และตัวรับจะรับคลื่นสะท้อนกลับ จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลระยะเวลาเดินทางของคลื่นเพื่อคำนวณเป็นระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 4 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเร็วเสียงในอากาศขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิและความชื้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทาง การศึกษาครั้งนี้จึงใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกร่วมกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจวัด



รูปที่ 4 อุปกรณ์เซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 [6]



รูปที่ 5 หลักการทำงานของเซนเซอร์อัลตราโซนิก

การทำงานของเซนเซอร์อัลตราโซนิกอาศัยหลักการพื้นฐานในการคำนวณระยะทางจากสมการ $s = vt$ โดยที่ s คือระยะทาง (เมตร), v คืออัตราเร็วของเสียงในอากาศ (เมตรต่อวินาที) และ t คือเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่น (วินาที) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทำงานของเซนเซอร์อัลตราโซนิกประกอบด้วยการส่งคลื่นเสียงออกไปกระทบวัตถุ และสะท้อนกลับมายังตัวรับ ทำให้เวลาที่เซนเซอร์วัดได้ครอบคลุมทั้งช่วงขาไปและขากลับ ดังนั้น ในการคำนวณระยะทางที่แท้จริง จะต้องนำเวลาที่วัดได้มาหารด้วย 2 เพื่อให้ได้เฉพาะระยะทางขาเดียว ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณระยะทางสำหรับเซนเซอร์อัลตราโซนิกจึงเขียนได้เป็น

$$s = \frac{vt}{2} \quad (1)$$

โดยที่ s คือระยะทางที่วัดได้ (เมตร), v คืออัตราเร็วของเสียงในอากาศโดยประมาณ (เมตรต่อวินาที), t คือเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากเซนเซอร์ไปถึงวัตถุและกลับมา (วินาที)

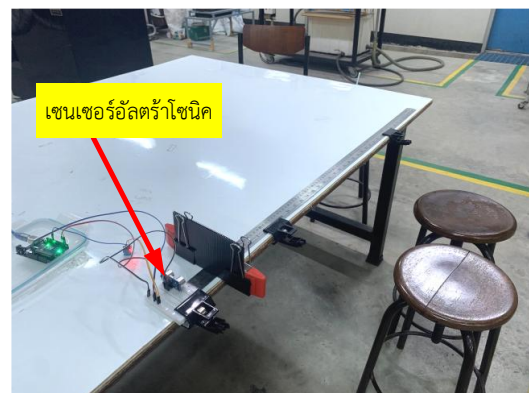
ที่อัตราเร็วของเสียงในอากาศโดยประมาณ v ในอากาศแห้งที่อุณหภูมิ 0°C มีค่าประมาณ 331.4 เมตรต่อวินาที นอกจากนี้อัตราเร็วของเสียงจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยประมาณ 0.606 เมตรต่อวินาทีต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1°C และความชื้นสัมพัทธ์ก็มีผลกระทบ

ต่ออัตราเร็วของเสียงด้วย โดยความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น 1% จะทำให้อัตราเร็วของเสียงเพิ่มขึ้นประมาณ 0.0124 เมตรต่อวินาที [7] ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ อัตราเร็วของเสียงในอากาศโดยประมาณ v สามารถประมาณได้จากสมการ

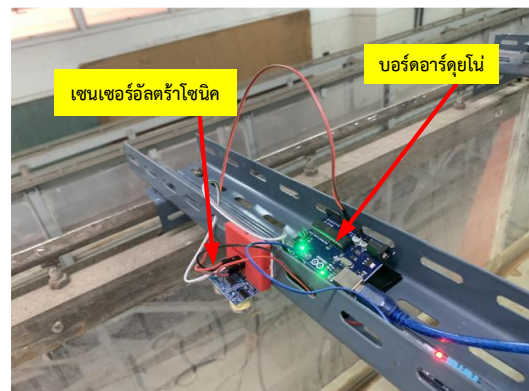
$$v = 331.4 + (0.606T) + (0.0124H) \quad (2)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิ(องศาเซลเซียส), H คือความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (%)

ก่อนเริ่มการทดลอง เซนเซอร์แต่ละตัวได้รับการตรวจสอบความแม่นยำ โดยเปรียบเทียบกับระยะทางที่วัดได้กับระยะทางจริงในสภาวะนิ่ง เพื่อประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ การวัดดำเนินการในช่วงระยะทางตั้งแต่ 0.05 ม. ถึง 0.70 ม. โดยเพิ่มระยะการอ่านทุก ๆ 0.05 ม. ดังแสดงในรูปที่ 5 ผลการตรวจสอบแสดงการเปรียบเทียบค่าระยะทางที่วัดได้กับระยะทางจริง และสรุปผลในช่วงระยะห่างประมาณ 0.30 ม., 0.50 ม. และ 0.70 ม. ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 หลังจากนั้นจึงติดตั้งชุดเซนเซอร์อัลตราโซนิกบริเวณส่วนบนของรางน้ำเปิด โดยเว้นระยะห่างระหว่างเซนเซอร์แต่ละตัวประมาณ 1.50 ม. และกำหนดความลาดเอียงของรางน้ำทดลองที่ 0.008 (0.8%) ตามที่แสดงในรูปที่ 6 (ก) และรูปที่ 6 (ข)



รูปที่ 5 ทดสอบอุปกรณ์เซนเซอร์อัลตราโซนิก



(ก) ชุดอุปกรณ์เซนเซอร์อัลตราโซนิก

รูปที่ 6 ติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์อัลตราโซนิกกับรางน้ำเปิด



(ข) ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกและบอร์ดอาร์ดูโน

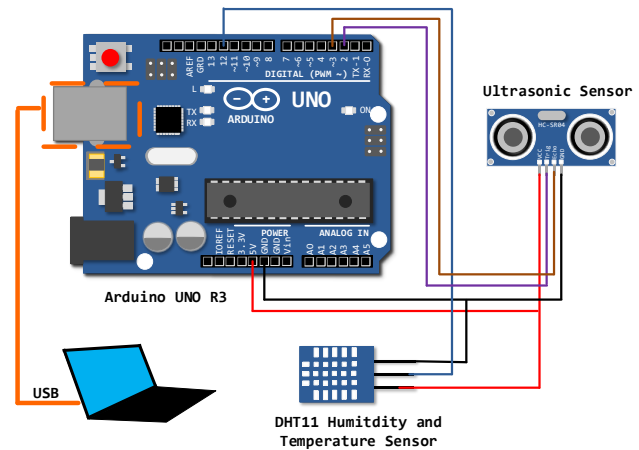
รูปที่ 6 ติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์อัลตราโซนิกกับรางน้ำเปิด (ต่อ)

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบค่าระยะทางที่วัดได้กับระยะทางจริงในสภาวะคงที่

ระยะทางจริง ในสภาวะนี้ (ม.)	เซนเซอร์อัลตรา โซนิก	S1	S2	S3	S4
	R ²	0.9998	0.9998	0.9998	0.9995
0.300	ระยะทางที่วัด ได้เฉลี่ย	0.301	0.294	0.302	0.300
	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	0.0000	0.0002	0.0003	0.0002
	ความคลาด เคลื่อน (ม.)	0.001	-0.006	0.002	0.000
0.500	ระยะทางที่วัด ได้เฉลี่ย	0.501	0.497	0.502	0.509
	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	0.0001	0.0002	0.0003	0.0002
	ความคลาด เคลื่อน (ม.)	0.001	-0.003	0.002	0.009
0.700	ระยะทางที่วัด ได้เฉลี่ย	0.692	0.684	0.694	0.691
	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	0.0003	0.0000	0.0003	0.0003
	ความคลาด เคลื่อน (ม.)	-0.008	-0.016	-0.006	-0.009

ชุดอุปกรณ์เซนเซอร์ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 จะทำงาน โดยส่งสัญญาณที่ตรวจวัดได้เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือบอร์ดอาร์ดูโน ซึ่งได้รับการเขียนโปรแกรมควบคุมโดยใช้สมการ (1) และ (2) เพื่อกำหนดตัว

แปรสำหรับเก็บข้อมูลระดับน้ำและแปลงข้อมูลเป็นค่าระยะทาง ข้อมูลที่ได้ จะนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเซนเซอร์อัลตราโซนิกโดย เปรียบเทียบกับข้อมูลจากเกจวัดความลึก



รูปที่ 7 การเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์ทดลอง

2.3 แนวทางการศึกษา

ในการออกแบบการทดลองได้พิจารณาถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ เซนเซอร์อัลตราโซนิกในการอ่านค่าความลึกการไหลและระดับของผิวน้ำ เปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จากเกจวัดความลึก โดยกำหนดอัตราการ ไหล (Discharge, Q) ในหน่วยลูกบาศก์เมตร/วินาที (ม.³/วินาที) ในรางน้ำ เปิดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.002-0.005 ลูกบาศก์เมตร/วินาที โดยมีความลึก การไหลอยู่ระหว่าง 0.04 ม. ถึง 0.30 ม. และมีการปรับบานประตูด้านท้าย น้ำเพื่อปรับระดับน้ำในรางน้ำเปิด ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อแบ่งการทดลอง ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 มีอัตราการไหล 3 ค่าคือ Q₁, Q₂ และ Q₃ ตลอดจนมีระยะห่างระหว่างผิวน้ำกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (distance, d) มากกว่า 0.40 ม. และกลุ่มที่ 2 มีอัตราการไหล 3 ค่า คือ Q₄, Q₅ และ Q₆ โดยมีระยะห่างระหว่างผิวน้ำกับเซนเซอร์อัลตราโซนิกน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.40 ม. พร้อมทั้งทำการบันทึกค่าความลึกการไหลและระดับของผิวน้ำของ เซนเซอร์อัลตราโซนิกและค่าที่ตรวจวัดได้จากเกจวัดความลึกไปพร้อมๆ กัน ในทุกตำแหน่ง

การเปรียบเทียบข้อมูลค่าความลึกการไหลและระดับของผิวน้ำ ครั้งนี้ได้ นี้เลือกใช้สถิติทดสอบที่นิยมใช้โดยทั่วไปในงานด้านอุทกวิทยา [8] ได้แก่ Percent Bias (PBIAS), Percent Error (PE), สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) และร้อยละความถูกต้อง (Accuracy, ACC) เป็นเกณฑ์การ เปรียบเทียบ โดย PBIAS ใช้ประเมินแนวโน้มเฉลี่ยของข้อมูลที่ตรวจวัดได้ จากเซนเซอร์อัลตราโซนิกว่ามีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัดได้จากเกจวัด ความลึก โดยค่าที่เหมาะสมควรมีค่าใกล้ 0 โดยหากค่าเป็นบวกแสดงว่า เซนเซอร์อัลตราโซนิกให้ผลต่ำกว่าค่าที่ได้จากเกจวัดความลึก และหากค่า เป็นลบแสดงว่าเซนเซอร์อัลตราโซนิกให้ผลสูงกว่าค่าที่ได้จากเกจวัดความลึก สำหรับ Percent Error (PE) ใช้แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าที่ ได้จากเซนเซอร์อัลตราโซนิกเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จากเกจวัด ความลึก ส่วนสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) นั้นตามที่ Arnold และคณะ [9] ได้ให้คำอธิบายไว้ว่าค่าสถิติ R² มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เมื่อค่า R² = 0 หมายถึง ข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กันและหากค่า R² = 1 หมายถึงข้อมูลมี ความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่ค่าความถูกต้องหรือแม่นยำ (Accuracy, ACC) ใช้แสดงถึงร้อยละความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จาก

เซนเซอร์อัลตราโซนิกเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากเกจวัดความลึก โดยค่าสถิติเหล่านี้จะถูกคำนวณตามสมการที่ (3) ถึงสมการที่ (6) ตามลำดับ

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^t (h_{gauge_{i,x}} - h_{sensor_{i,x}})}{\sum_{i=1}^n h_{gauge_{i,x}}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$PE = \left(\frac{\sum_{i=1}^t |h_{gauge_{i,x}} - h_{sensor_{i,x}}|}{\sum_{i=1}^n |h_{gauge_{i,x}}|} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (h_{gauge_{i,x}} - \bar{h}_{gauge_{i,x}})(h_{sensor_{i,x}} - \bar{h}_{sensor_{i,x}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{gauge_{i,x}} - \bar{h}_{gauge_{i,x}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{sensor_{i,x}} - \bar{h}_{sensor_{i,x}})^2}} \right)^2 \quad (5)$$

$$ACC = 100 - \left(\frac{\sum_{i=1}^t |h_{gauge_{i,x}} - h_{sensor_{i,x}}|}{\sum_{i=1}^n |h_{gauge_{i,x}}|} \right) \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ n คือจำนวนของข้อมูลที่ตรวจวัดทั้งหมด $h_{gauge_{i,x}}$ คือ ความสูงของระดับน้ำที่วัดได้จากเกจวัดความลึก $\bar{h}_{gauge_{i,x}}$ คือ ความสูงเฉลี่ยของระดับน้ำที่วัดได้จากเกจวัดความลึก ณ เวลา t ที่หน้าตัด x (เมตร), $h_{sensor_{i,x}}$ คือ ความสูงของระดับน้ำที่วัดได้จากเซนเซอร์อัลตราโซนิก และ $\bar{h}_{sensor_{i,x}}$ คือ ความสูงเฉลี่ยของระดับน้ำที่วัดได้จากเซนเซอร์อัลตราโซนิก ณ เวลา t ที่หน้าตัด x (เมตร)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษา

ผลการเปรียบเทียบการตรวจวัดความลึกของการไหลและระดับผิวน้ำโดยใช้เกจวัดความลึก (h_{gauge}), เซนเซอร์อัลตราโซนิก (h_{sensor}) และการวัดระยะห่างระหว่างผิวน้ำกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก แยกการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม ผลการตรวจวัดแสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยในกลุ่มที่ 1 พบว่าระยะห่างระหว่างผิวน้ำกับเซนเซอร์อัลตราโซนิกอยู่ระหว่าง 0.48 ม. ถึง 0.53 ม. ส่วนกลุ่มที่ 2 พบว่าระยะห่างอยู่ระหว่าง 0.29 ม. ถึง 0.40 ม.

ผลการทดสอบพบว่า ข้อมูลกลุ่มที่ 1 มีค่า PBIAS อยู่ระหว่าง -5.3 ถึง 5.2 ค่า PE อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 5.3 ค่า R^2 เท่ากับ 0.9788 และค่า ACC อยู่ระหว่าง 94.7-99.8 ข้อมูลกลุ่มที่ 2 พบว่าค่า PBIAS อยู่ระหว่าง -1.6 ถึง 1.5 ค่า PE อยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 1.6 ค่า R^2 เท่ากับ 0.9952 และค่า ACC อยู่ระหว่าง 98.5-99.7 ผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 8

3.2 อภิปรายผล

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบระหว่างทั้ง 2 กลุ่ม พบว่ากลุ่มที่ 1 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างผิวน้ำกับเซนเซอร์อัลตราโซนิกมากกว่า 0.40 ม. มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่ากลุ่มที่ 2 ที่มีระยะห่างน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.40 ม. โดยสังเกตได้จากค่า PBIAS และ PE ที่สูงกว่า รวมถึงค่า ACC ที่ต่ำกว่า

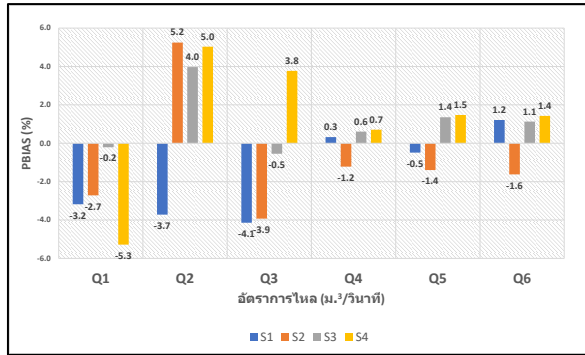
เมื่อพิจารณาจากรูปตัดการไหล (flow profile) ในรูปที่ 9 (ก) ร่วมกับตารางที่ 2 จากกราฟ พบว่าในช่วงกลุ่มที่ 1 ข้อมูลจากเซนเซอร์อัลตราโซนิก S1, S2, S3 และ S4 แต่ละตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนกับข้อมูลจากเกจวัดความลึกค่อนข้างชัดเจน โดยมีค่า PE เฉลี่ยเท่ากับ 3.5 ค่า R^2 และ ACC เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.9788 และ 96.5 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าข้อมูลในช่วงกลุ่มที่ 2

จากรูปที่ 9 (ข) กราฟแสดงให้เห็นว่าในกลุ่มที่ 2 ข้อมูลจากเซนเซอร์อัลตราโซนิก S1, S2, S3 และ S4 และเกจวัดความลึก มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่า PE เฉลี่ยเท่ากับ 1.1 ค่า R^2 และ ACC เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.9952 และ 98.9 ตามลำดับ

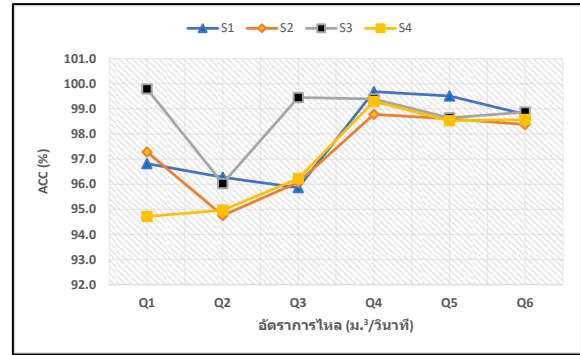
การทดสอบครั้งนี้พบว่า ระยะห่างระหว่างผิวน้ำกับอุปกรณ์เซนเซอร์อัลตราโซนิกมีผลต่อประสิทธิภาพในการอ่านค่าความลึกการไหลและระดับของผิวน้ำ จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด พบว่า ระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานอุปกรณ์เซนเซอร์อัลตราโซนิกในการตรวจวัดความลึกการไหลและระดับของผิวน้ำในรางน้ำเปิดไม่ควรเกิน 0.40 เมตร เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานของเซนเซอร์ทั้ง 4 ตัวที่ระยะนี้ให้ค่า PBIAS อยู่ในช่วง -1.6 ถึง 1.5 ค่า PE, R^2 และ ACC เฉลี่ยเท่ากับ 1.1, 0.9952 และ 98.9 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับการทดสอบในครั้งนี้

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบการตรวจวัดความลึกการไหลและระดับของผิวน้ำ

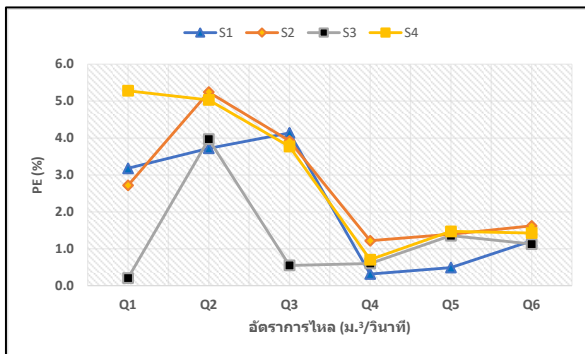
เซนเซอร์อัลตราโซนิก	อัตราการไหล (ม ³ /วินาที)		PBIAS (%)	PE (%)	ACC (%)	h _{gauge} (ม.)	h _{sensor} (ม.)	ระยะห่างผิวน้ำกับเซนเซอร์ (ม.)
S1	Q ₁	0.003	-3.2	3.2	96.8	0.036	0.037	0.53
S2			-2.7	2.7	97.3	0.046	0.047	0.52
S3			-0.2	0.2	99.8	0.060	0.060	0.51
S4			-5.3	5.3	94.7	0.062	0.065	0.49
S1	Q ₂	0.004	-3.7	3.7	96.3	0.039	0.040	0.52
S2			5.2	5.2	94.8	0.049	0.046	0.52
S3			4.0	4.0	96.0	0.062	0.060	0.51
S4			5.0	5.0	95.0	0.068	0.065	0.49
S1	Q ₃	0.005	-4.1	4.1	95.9	0.041	0.042	0.52
S2			-3.9	3.9	96.1	0.060	0.062	0.50
S3			-0.5	0.5	99.5	0.071	0.071	0.50
S4			3.8	3.8	96.2	0.085	0.081	0.48
S1	Q ₄	0.002	0.3	0.3	99.7	0.166	0.165	0.40
S2			-1.2	1.2	98.8	0.175	0.177	0.39
S3			0.6	0.6	99.4	0.183	0.182	0.39
S4			0.7	0.7	99.3	0.194	0.192	0.36
S1	Q ₅	0.004	-0.5	0.5	99.5	0.170	0.170	0.39
S2			-1.4	1.4	98.6	0.184	0.187	0.38
S3			1.4	1.4	98.6	0.190	0.187	0.38
S4			1.5	1.5	98.5	0.201	0.198	0.36
S1	Q ₆	0.005	1.2	1.2	98.8	0.235	0.232	0.33
S2			-1.6	1.6	98.4	0.245	0.248	0.31
S3			1.1	1.1	98.9	0.255	0.252	0.32
S4			1.4	1.4	98.6	0.267	0.263	0.29



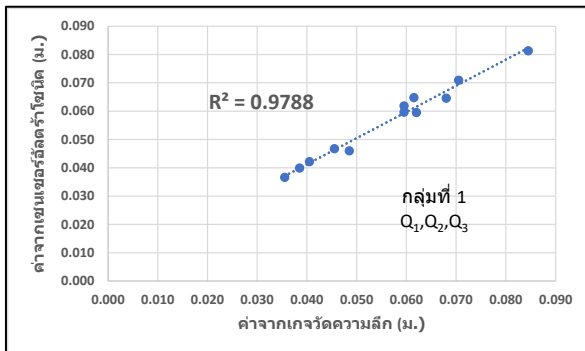
(ก) เปรียบเทียบข้อมูลโดย PBIAS



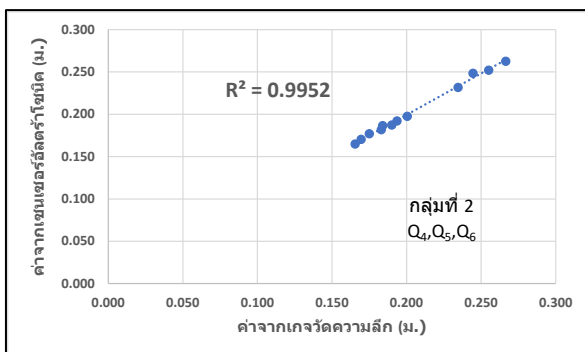
(จ) เปรียบเทียบข้อมูลโดย ACC



(ข) เปรียบเทียบข้อมูลโดย PE



(ค) เปรียบเทียบข้อมูลโดย R^2 (กลุ่มที่ 1)



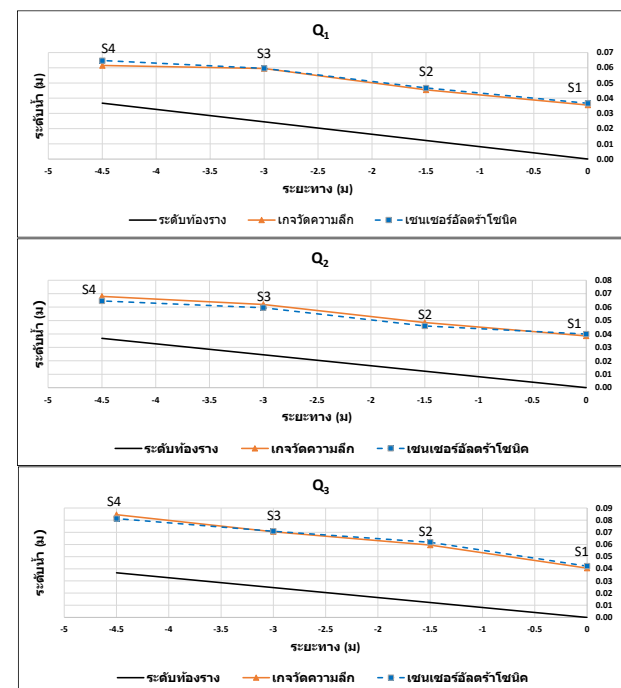
(ง) เปรียบเทียบข้อมูลโดย R^2 (กลุ่มที่ 2)

รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลการตรวจวัดความลึกการไหลและระดับของผิวน้ำที่ได้จากเกจวัดความลึก (h_{gauge}) ,เซนเซอร์อัลตราโซนิก (h_{sensor})

รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลการตรวจวัดความลึกการไหลและระดับของผิวน้ำที่ได้จากเกจวัดความลึก (h_{gauge}) ,เซนเซอร์อัลตราโซนิก (h_{sensor}) (ต่อ)

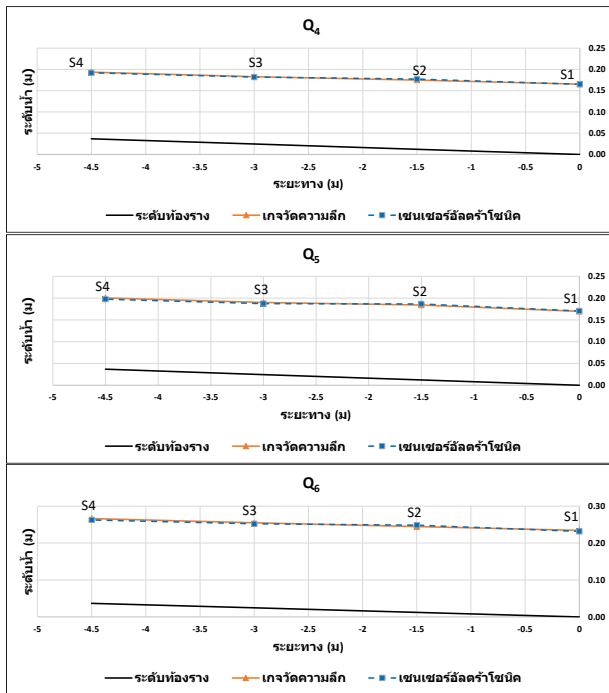
4. สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ระบบเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ใช้ในการทดลองสามารถให้ข้อมูลที่มีความถูกต้องและแม่นยำในระดับที่น่าพอใจ เมื่อระยะห่างระหว่างผิวน้ำกับเซนเซอร์อยู่ระหว่าง 0.29 ม. ถึง 0.40 ม. โดยข้อมูลที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และสามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดความลึกของการไหลและระดับผิวน้ำในรางน้ำเปิดภายในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ ร่วมกับวิธีการวัดแบบดั้งเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากนำไปประยุกต์ใช้งานจริง จะสามารถช่วยลดเวลาในการรวบรวมข้อมูล ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากสามารถตรวจวัดระดับน้ำได้ทั้งในลักษณะจุดเดียวและแบบต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ประกอบการใช้งานด้วย เช่น ระยะห่างระหว่างผิวน้ำกับเซนเซอร์ อัตราการไหล คุณภาพของอุปกรณ์ อุณหภูมิในพื้นที่ และเงื่อนไขเฉพาะของแต่ละการทดลอง เป็นต้น ทั้งนี้ หวังว่าผลการศึกษาครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้กับการทดลองในรางน้ำได้รูปแบบอื่น ๆ ได้อีกในอนาคต



(ก) กลุ่มที่ 1

รูปที่ 9 รูปตัดการไหล (flow profile)



(ข) กลุ่มที่ 2

รูปที่ 9 รูปตัดการไหล (flow profile) (ต่อ)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทำการศึกษารวมทั้งขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ที่ให้การช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จนสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Arduino. (2018). *What is Arduino?* Retrieved April 26, 2025, from <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [2] ธิญญรัตน์ วงศ์เก้, ปณัสดา อวิคุณประเสริฐ และ ชยานนท์ อวิคุณประเสริฐ. (2560). อุปกรณ์วัดความสูงแบบดิจิทัลโดยใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิก. *Journal of Associated Medical Sciences.*, vol. 50, No. 3, หน้า.435-441
- [3] ฟิ่งและ ภูษิตา, อัญญุโพธิ์ พันธิตรา, รื่นเริง คณาธิป, ชารีฟ มุกลิต, รูปแก้ว อนุชมา, และ จรรจลานิมิตร สงกรานต์. (2024). เครื่องต้นแบบการวัดระดับน้ำในบ่อปลาด้วยอัลตราโซนิกเซนเซอร์. *วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า* 2, ปี 2, ฉบับที่ 1-2, ธันวาคม 2024, หน้า. 65-75
- [4] ธวัชชัย ขาญสูงเนิน, พิสิฐพงศ์ แป้นทอง, ทศน์พลฉัตรเกาะ, วศินฤทธิสนธิ์ (2020). การพัฒนาเครื่องวัดระดับน้ำแบบแจ้งเตือนผ่านข้อความสั้นสำหรับอ่างเก็บน้ำขนาดเล็กด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิก. *Journal of Vongchavalitkul university* ,33(2): หน้า 71-77
- [5] <https://www.sumipol.com/knowledge/all-about-depth-gauge>
- [6] Cytron Technologies. (2013). Product user's manual—HC-SR04 ultrasonic sensor. Cytron Technologies, Bukit Mertajam, Malaysia.
- [7] วิกีพีเดีย. (2568). *อัตราเร็วของเสียง*. สืบค้นเมื่อ 26 เมษายน 2568, จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/อัตราเร็วของเสียง>
- [8] Moriasi, D. N., et al. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), pp. 885–900.
- [9] Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N. and Jha, M. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), pp. 1491–1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>