

การประเมินจุดรั่วไหลของเหลวโดยการวัดอัลตร้าโซนิค

นายจิรายุทธ หาญโสด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2569

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การประเมินจุดรั่วไหลของเหลวโดยการวัดอัลตร้าโซนิค

นายจิรายุทธ หาญโสด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2569

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การประเมินจุดรั่วไหลของเหลวโดยการวัดอัลตร้าโซนิค

โดย นายจิรายุทธ หาญโสด

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ

..... รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.เสาวณิต สุขภารังษี)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชร ส่งเสริม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.นที ทองอุ่น)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วงศกร วงศาโรจน์)

ชื่อ : นายจิรายุทธ หาญโสด
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การประเมินจุดรั่วไหลของเหลวโดยการวัดอัลตร้าโซนิค
สาขาวิชา : วิศวกรรมอัตโนมัติ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.นที ทองอุ่น
ปีการศึกษา : 2569

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการรั่วไหลของของเหลวเกิดขึ้นได้ในหลายอุตสาหกรรมเนื่องจากอุบัติเหตุในระหว่างกระบวนการทำงาน ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในโรงงาน ผู้คนรอบข้าง และสิ่งแวดล้อมเมื่อของเหลวรั่วไหลออกจากภาชนะหรือถัง เทคนิคการวัดที่สามารถระบุตำแหน่งการรั่วไหลจึงเป็นสิ่งจำเป็น วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการวัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง พร้อมการปรับตั้งทรานสดิเซอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้โพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วการไหลสำหรับแสดงภาพตำแหน่งรั่วไหลในภาชนะบรรจุของเหลว ระบบการวัดใช้ทรานสดิวเซอร์ที่มีตัวส่งหนึ่งตัวและตัวรับสองตัวและเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์พร้อมรับสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณ โดยใช้เทคนิค Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) ร่วมกับสมการการสร้างเวกเตอร์เป็นอัลกอริทึมในการวัด การปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับและมุมการติดตั้งตัวรับจะถูกปรับเพื่อให้ได้ผลการวัดที่แม่นยำ การทดลองดำเนินการในถังน้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการจำลองตำแหน่งการรั่วไหลพร้อมสาธิตการใช้งานร่วมกับแขนกล ผลลัพธ์โพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วที่ได้รับมีความสมเหตุสมผลด้วยการใช้การปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถประมาณตำแหน่งการรั่วไหลได้

(มีจำนวนทั้งสิ้น 63 หน้า)

คำสำคัญ : คลื่นเสียงความถี่สูง เวกเตอร์ความเร็ว การรั่วไหล

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Jirayut Hansot
Thesis Title : Identification of Liquid Leakage Point using Ultrasonic Measurement
Major Field : Automation Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Natree Tongaun
Academic Year : 2026

ABSTRACT

Nowadays, in several industries, liquid leakage occurs probably during accident circumstances in the process. This event is able to injure plant operators, nearby humans, and harm the environment when it leaks out of the container or vessel. A measurement technique that is able to identify the leakage location is necessity. This paper presents an ultrasonic measurement technique with optimized transducer configuration to obtain the flow velocity vector profiles for visualizing the leakage point in the liquid container. The measurement system employs ultrasonic transducer with one emitter and two receivers, and multiple channel pulser/receiver. The ultrasonic velocity profiler (UVP) and vector reconstruction formula are used as the measurement algorithm. The transducers configuration whether gap distance between emitter and receiver, and angle installation of receiver, is adjusted to make accurate measurement result. The experimental demonstration was executed in the rectangular water tank that leakage location simulated and used in conjunction with a robotic arm.The velocity vector profile was derived reasonably via the utilization of optimized transducer configuration, which was able to estimate the leakage location.

(Total 63 Pages)

Keywords: Ultrasonic, Velocity Vector, Leakage

_____ Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา ความเอาใจใส่ และการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่านผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมสำคัญในการดำเนินงานจนสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งไว้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นที ทองอุ่น ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยและปรับปรุงวิทยานิพนธ์อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการศึกษา ความเมตตาและความทุ่มเทของท่านนับเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วงศกร วงศาโรจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและพลังงานไฟฟ้า ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการวางแผนการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลในการดำเนินการทดลองตลอดระยะเวลาการศึกษา

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการพิจารณา ตรวจสอบ และให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ ซึ่งช่วยยกระดับคุณภาพของวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์และมีความถูกต้องทางวิชาการมากยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านวิชาการ การประสานงาน และการอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยงานหรือองค์กรที่ให้การสนับสนุนสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ และทรัพยากรที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ซึ่งล้วนมีส่วนช่วยให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนทั้งด้านกำลังกาย กำลังใจ และความเข้าใจตลอดระยะเวลาของการศึกษา และการเสียสละของทุกท่านเป็นแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถก้าวผ่านอุปสรรคต่าง ๆ และดำเนินการศึกษาจนสำเร็จ หากวิทยานิพนธ์บับนี้มีข้อบกพร่องหรือความคลาดเคลื่อนประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์เพื่อการพัฒนางานวิชาการในโอกาสต่อไป

จิรายุทธ หาญโสด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ

กิตติกรรมประกาศ ฉ

สารบัญ ช

สารบัญตาราง ฌ

สารบัญรูปภาพ ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 วิธีการวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) 4

2.2 คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Wave) 10

2.3 การแพร่กระจายของคลื่นเสียง (Sound Wave Propagation) 13

2.4 อนุภาคติดตามการไหล (Tracer Particle) 17

2.5 สัญญาณสะท้อน (Echo Signal) 18

2.6 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) 20

2.7 เทคนิคการส่งพัลส์ซ้ำ (Pulse Repetition Technique) 20

2.8 Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) 20

2.9 คุณภาพสัญญาณ (Signal Quality) 32

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 33

บทที่ 3 การปรับตั้งอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์สำหรับการวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็ว 38

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 38

3.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ (Parameter Configuration) 41

3.3 การทดลองปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ 41

3.4 การทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหล 44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การทดลองประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกล	46
บทที่ 4 ผลการทดลองการประเมินจุดรั่วไหลด้วยเทคนิค UVP	49
4.1 ผลการทดลองการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์	49
4.2 ผลการทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหล	53
4.3 ผลการทดลองประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกล’	58
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	60
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	60
บรรณานุกรม	61
ประวัติผู้เขียน	63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3-1 รายละเอียดทรานสดิวเซอร์สำหรับสร้างคลื่นเสียงความถี่สูง 38

3-2 รายละเอียดทรานสดิวเซอร์สำหรับรับคลื่นเสียงความถี่สูง 39

3-3 รายละเอียดเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์และเครื่องรับสัญญาณ 39

3-4 รายละเอียดคอมพิวเตอร์สำหรับการประมวลผล 40

3-5 รายละเอียดแขนกล 40

3-6 รายละเอียดอนุภาคติดตามการไหล 41

3-7 รายละเอียดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง 41

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 ความแตกต่างระหว่างของเหลวและก๊าซ 4

2-2 หลักการพื้นฐานเทคนิค UVP แบบ Single-Element 20

2-3 กระบวนการประมวลผลสัญญาณดอปเพลอร์ 22

3-1 ทรานสดิวเซอร์สำหรับสร้างคลื่นเสียงความถี่สูง 38

3-2 ทรานสดิวเซอร์สำหรับรับคลื่นเสียงความถี่สูง 39

3-3 เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์และเครื่องรับสัญญาณ 39

3-4 คอมพิวเตอร์สำหรับการประมวลผล 40

3-5 แขนกล DOBOT MG400 40

3-6 อนุภาคติดตามการไหล 41

3-7 ระบบการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ 41

3-8 พารามิเตอร์การปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ 42

3-9 การติดตั้งเส้นด้ายกับแขนกล 42

3-10 การติดตั้งทรานสดิวเซอร์กับตัวยึด 43

3-11 การตั้งค่าการทดลองสำหรับการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ 43

3-12 โปรแกรมควบคุมการทำงานแขนกล 44

3-13 ตัวอย่างสัญญาณดอปเพลอร์ 44

3-14 ระบบการวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหล 44

3-15 การตั้งค่าการทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็ว 45

3-16 ตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ในของเหลว 45

3-17 ตำแหน่งทรานสดิวเซอร์ X:100 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร 45

3-18 ตำแหน่งทรานสดิวเซอร์ X:150 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร 46

3-19 ตำแหน่งทรานสดิวเซอร์ X:70 มิลลิเมตร. Y:-70 มิลลิเมตร 46

3-20 ระบบการประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกล 46

3-21 โปรแกรม LabVIEW สำหรับควบคุมแขนกล 47

3-22 โปรแกรม DobotStudio Pro สำหรับควบคุมแขนกล 47

3-23 การตั้งค่าการทดลองประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกล 48

3-24 ตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ในของเหลว 48

3-25 ตำแหน่งทรานสดิวเซอร์กับแขนกล X:70 มิลลิเมตร. Y:70 มิลลิเมตร 48

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3-26 ตำแหน่งทรานสดิวเซอร์กับแขนกล X:70 มิลลิเมตร. Y:-70 มิลลิเมตร 48

4-1 รายล่ะเอียดการเก็บข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 0 องศา 50

4-2 รายล่ะเอียดการเก็บข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 10 องศา 50

4-3 รายล่ะเอียดการเก็บข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 20 องศา 50

4-4 รายล่ะเอียดการเก็บข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 30 องศา 50

4-5 รายล่ะเอียดการเก็บข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 40 องศา 50

4-6 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 0 องศา 51

4-7 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 10 องศา 51

4-8 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 20 องศา 51

4-9 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 30 องศา 51

4-10 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 40 องศา 52

4-11 มุม 10 องศา ระยะห่าง 16 มิลลิเมตร X:100 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร 54

4-12 มุม 10 องศา ระยะห่าง 20 มิลลิเมตร X:100 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร 54

4-13 มุม 40 องศา ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร X:100 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร 54

4-14 มุม 40 องศา ระยะห่าง 12 มิลลิเมตร X:100 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร 55

4-15 ค่าเบียงเบนมารตฐานเวกเตอร์ความเร็ว X:100 มิลลิเมตร Y:0 มิลลิเมตร 55

4-16 มุม 10 องศา ระยะห่าง 16 มิลลิเมตร X:150 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร 56

4-17 มุม 10 องศา ระยะห่าง 20 มิลลิเมตร X:150 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร 56

4-18 มุม 40 องศา ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร X:150 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร 56

4-19 มุม 40 องศา ระยะห่าง 12 มิลลิเมตร X:150 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร 57

4-20 ค่าเบียงเบนมารตฐานเวกเตอร์ความเร็ว X:150 มิลลิเมตร Y:0 มิลลิเมตร 57

4-21 มุม 10 องศา ระยะห่าง 16 มิลลิเมตร X:70 มิลลิเมตร. Y:-70 มิลลิเมตร 58

4-22 มุม 10 องศา ระยะห่าง 20 มิลลิเมตร X:70 มิลลิเมตร. Y:-70 มิลลิเมตร 58

4-23 ผลการวัดร่วมกับแขนกล X:70 มิลลิเมตร Y:70 มิลลิเมตร 59

4-24 ผลการวัดร่วมกับแขนกล X:70 มิลลิเมตร Y:-70 มิลลิเมตร 59

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเปนมาและความสำคัญของปญหา

ในโรงงานอุตสาหกรรมการรั่วไหลของของเหลวในกระบวนการสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่กระบวนการทำงานผิดปกติหรือมีอุบัติภัย เช่น ในอุตสาหกรรมเคมีถ้าของเหลวในกระบวนการเป็นสารเคมีหรือของเหลวอันตรายและรั่วไหลสู่ภายนอก สารเคมีหรือของเหลวเหล่านั้นจะทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์การรั่วไหลของน้ำหล่อเย็นในเตาปฏิกรณ์ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทำให้เกิดการรั่วไหลของกัมมันตรังสีสู่ภายนอก [1] ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตรวมถึงมนุษย์ในระยะยาว ดังนั้น การสำรวจจุดรั่วไหลของสารเคมีหรือของเหลวภายในถังรีแอคเตอร์หรือหม้อต้มจึงเป็นเรื่องจำเป็นเพื่อจัดการกับการรั่วไหลได้อย่างทันท่วงที

การประเมินจุดรั่วไหลของเหลว (Liquid Leakage Point Estimation) ต้องพึ่งพาหุ่นยนต์เพื่อเข้าไปสำรวจจุดรั่วไหลซึ่งเป็นพื้นที่อันตราย โดยจะทำงานร่วมกับตัววัดประเมินจุดรั่วไหล ปฏิเสธไม่ได้ว่าตัวตรวจรู้หรือตัววัดเป็นส่วนสำคัญในการสำรวจและประเมินจุดรั่วไหล ตัววัดที่ปฏิบัติการต้องสามารถทนต่อสภาวะทางเคมี กัมมันตรังสี และความทึบแสง ดังนั้น การสำรวจโดยใช้เทคนิคด้านสัญญาณภาพจึงมีข้อจำกัด [2]

ปัจจุบันมีเทคโนโลยีอัลตร้าซาวด์ (Ultrasound) ซึ่งสามารถวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector Profile) ในของเหลว เทคนิคนี้ชื่อ Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) ถูกประยุกต์ใช้กับของเหลวหลายชนิด เช่น Water, Liquid Sodium, Liquid Metal และ Magnetic Liquid [3, 4, 5, 6] เทคนิคนี้มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินจุดรั่วไหลของของเหลว ซึ่งทนต่อกัมมันตรังสีและใช้งานได้กับของไหลทึบแสงพร้อมทั้งสามารถออกแบบให้ใช้งานในสารเคมีที่กัดกร่อนได้ การศึกษาที่ผ่านมาทรานสดิวเซอร์แบบหลายอิลิเมนต์ (Multi-Element Transducer) ที่ทำงานร่วมกับเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์พร้อมรับสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณ (Multiple Channel Ultrasonic Pulser&Receiver) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector Measurement) และประเมินจุดรั่วไหลของเหลว [7, 8] อย่างไรก็ตามทรานสดิวเซอร์แบบหลายอิลิเมนต์มีการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่น (Emitter) กับตัวรับคลื่น (Receiver) คือ (Transducers Gap) และองศาการติดตั้งตัวรับคลื่น (Receiver Installation Angle) ไว้คงที่ ซึ่งระยะห่างและองศาการติดตั้งที่กำหนดมีผลต่อคุณภาพ

ของการวัดในแต่ละช่วงระยะความลึกของการวัด (Measurement Depth) ซึ่งนำไปสู่ความผิดพลาดของการประเมินจุดรั่วไหลของของเหลวได้

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลของเหลวโดยเทคนิค UVP โดยใช้ทรานสดิวเซอร์แบบหลายอิลิเมนต์ และวิเคราะห์ประเมินการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นกับตัวรับคลื่น และองศาการติดตั้งตัวรับคลื่นเพื่อส่งเสริมคุณภาพของการวัดและประเมินจุดรั่วไหลของเหลว

1.2 วัตถุประสงคของการวิจัย

1.2.1 การวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลของเหลวโดยเทคนิค UVP โดยใช้ทรานสดิวเซอร์แบบหลายอิลิเมนต์

1.2.2 วิเคราะห์ประเมินการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นกับตัวรับคลื่น และองศาการติดตั้งตัวรับคลื่น เพื่อการวัดที่มีคุณภาพตลอดช่วงระยะความลึกของการวัด

1.2.3 สาธิตการใช้งานร่วมกับแขนกลเพื่อจำลองการประเมินจุดรั่วไหลของเหลว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์ประเมินการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นกับตัวรับคลื่น และองศาการติดตั้งตัวรับคลื่นของทรานสดิวเซอร์

1.3.2 วัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลของเหลวด้วยเทคนิค UVP และการติดตั้งทรานสดิวเซอร์จากผลลัพธ์ข้อ 1.3.1

1.3.3 การประเมินจุดรั่วไหลของเหลวด้วยการทำงานร่วมกันของเทคนิค UVP และแขนกล

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและกำหนดวิธีการสำหรับการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

1.4.2 วิเคราะห์ประเมินการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นกับตัวรับคลื่น และองศาการติดตั้งตัวรับคลื่น

1.4.2.1 ติดตั้งและประกอบอุปกรณ์การทดลอง

1.4.2.2 เขียนโปรแกรมการวัดอัลตร้าโซนิคสำหรับการทดลองโดยโปรแกรม LabVIEW

1.4.2.3 ดำเนินการทดลองในแต่ละระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นกับตัวรับคลื่น และองศาการติดตั้งตัวรับคลื่น

1.4.2.4 วิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio) ของการทดลองในแต่ละช่วงระยะความลึกของการวัด

1.4.2.5 คัดเลือกการติดตั้งที่กำหนดระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นกับตัวรับคลื่นและองศาการติดตั้งตัวรับคลื่นที่ดีและด้อยที่สุดเพื่อการทดลองการวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลของเหลวในหัวข้อถัดไป

1.4.3 การวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลของเหลว

1.4.3.1 ติดตั้งและประกอบอุปกรณ์การทดลอง

1.4.3.2 เขียนโปรแกรมการวัดอัลตร้าโซนิคสำหรับการทดลองโดยโปรแกรม LabVIEW

1.4.3.3 ดำเนินการทดลองการวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลของเหลวด้วยการติดตั้งที่กำหนดจากระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นกับตัวรับคลื่น และองศาการติดตั้งตัวรับคลื่นที่วิเคราะห์ในหัวข้อที่ 1.4.2

1.4.3.4 วิเคราะห์ค่าทางสถิติที่ประเมินความถูกต้องในการวัด

1.4.4 การประเมินจุดรั่วไหลของเหลวร่วมกับแขนกล

1.4.4.1 ติดตั้งและประกอบอุปกรณ์การทดลอง

1.4.4.2 เขียนโปรแกรมการวัดอัลตร้าโซนิคสำหรับการทดลองโดยโปรแกรม LabVIEW และโปรแกรมควบคุมแขนกล

1.4.4.3 ดำเนินการทดลองการวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วประเมินจุดรั่วไหลของเหลว

1.4.4.4 วิเคราะห์ค่าทางสถิติที่ประเมินความถูกต้องในการวัด

1.4.5 สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพิ่มความถูกต้องของการวัดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคในการประเมินจุดรั่วไหลของเหลว

1.5.2 สามารถนำไปต่อยอดใช้งานร่วมกับหุ่นยนต์เพื่อวินิจฉัยการรั่วไหลของของเหลวที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม เช่น การรั่วไหลของสารเคมีอันตราย การรั่วไหลของน้ำหล่อเย็นในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และอื่น ๆ

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics)

2.1.1 ของไหล (Fluid)

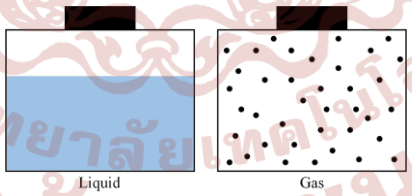
เป็นสสารที่ไม่สามารถคงรูปร่างของตัวเองได้สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่อง และจะเปลี่ยนรูปร่างตามภาชนะที่บรรจุของไหลหรือเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงมากระทำกับของไหล โดยการเคลื่อนที่ของของไหลจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีแรงเฉือน (Shear Stress) มากระทำกับของไหล ซึ่งอนุภาคภายในของไหลจะเคลื่อนที่สัมพันธ์กันทำให้สามารถไหลภายในท่อหรือภาชนะได้ ของไหลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

2.1.1.1 ของเหลว (Liquid)

เป็นของไหลที่มีปริมาตรค่อนข้างคงที่ เปลี่ยนแปลงรูปร่างตามภาชนะที่บรรจุและอัดตัวได้ยาก เนื่องจากโมเลกุลของของเหลวอยู่ค่อนข้างชิดกันทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง เช่น น้ำ น้ำมัน ปรอท

2.1.1.2 ก๊าซ (Gas)

เป็นของไหลที่มีปริมาตรที่ไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงรูปร่างตามภาชนะที่บรรจุพร้อมทั้งขยายตัวเต็มภาชนะนั้น ๆ และอัดตัวได้ง่ายเนื่องจากโมเลกุลของก๊าซอยู่ห่างกันมาก มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อยทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เช่น ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



ภาพที่ 2-1 ความแตกต่างระหว่างของเหลวและก๊าซ

2.1.2 คุณสมบัติของไหล

2.1.2.1 ความหนาแน่น (Density)

เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของไหลที่ใช้บ่งบอกถึงปริมาณมวลของสารที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยปริมาตร เช่น หากของไหล 2 ชนิด มีปริมาตรเท่ากัน ของไหลที่มีมวลมากกว่าจะมีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่า ความหนาแน่นจึงเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงปริมาณมวลของสารต่อปริมาตรและเป็นคุณสมบัติที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหล การเกิดแรงลอยตัว การกระจายของสาร ซึ่งสามารถคำนวณความหนาแน่นได้ตามสมการที่ (2-1)

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของไหล (kg/m^3)

m คือ มวลของไหล (kg)

V คือ ปริมาตรของไหล (m^3)

จากสมการที่ (2-1) จะเห็นได้ว่าเมื่อมวลของไหลเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาตรคงที่ ความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน หากปริมาตรเพิ่มขึ้นโดยที่มวลคงที่ ความหนาแน่นจะมีค่าลดลง ดังนั้น ความหนาแน่นจึงเป็นสิ่งที่สะท้อนให้เห็นถึงความเข้มข้นของมวลภายในปริมาตรของไหลโดยตรง สำหรับของไหลที่เป็นของเหลว ความหนาแน่นจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง แต่จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิมีค่าที่สูงขึ้นเนื่องจากของเหลวเกิดการขยายตัวทางความร้อน ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของไหลที่เป็นก๊าซ ความหนาแน่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีเมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น ในการคำนวณค่าความหนาแน่นจึงจำเป็นต้องพิจารณาสภาวะแวดล้อมร่วมด้วย

2.1.2.2 ความหนืด (Viscosity)

เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของไหลที่บ่งบอกถึงความสามารถของไหลในการต้านทานการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วระหว่างชั้นของไหลที่อยู่ติดกัน เมื่อของไหลเกิดการไหลชั้นของไหลในแต่ละชั้นมักเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เท่ากันทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในระหว่างชั้นของไหล แรงเสียดทานนี้เกิดจากการถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลของไหล เรียกว่า แรงเฉือน (Shear Stress) โดยความหนืดเป็นสิ่งที่บ่งบอกความสามารถในการต้านแรงเฉือนของของไหล ของไหลที่มีค่าความหนืดสูงจะไหลได้ยากเนื่องจากมีแรงต้านภายในสูง เช่น น้ำผึ้ง น้ำมันหล่อลื่น ในส่วนของไหลที่มีค่าความหนืดต่ำจะสามารถไหลได้ง่ายกว่าเนื่องจากแรงเสียดทานภายในระหว่างชั้นของของไหลน้อย เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ ซึ่งความหนืดของของไหลที่เป็นของเหลวสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นอยู่กับอิทธิพลของอุณหภูมิและความดัน โดยทั่วไปของเหลวจะมีค่าความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากโมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามของไหลที่เป็นก๊าซจะมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลมีมากขึ้น ดังนั้น ความหนืดจึงเป็นคุณสัมบัติที่สำคัญต่อการวิเคราะห์การไหลของของไหลและอุปกรณ์วัดการไหลต่าง ๆ รวมถึงระบบ UVP เนื่องจากค่าความหนืดมีผลต่อการกระจายตัวของโพรไฟล์ความเร็ว การสูญเสียพลังงานภายในและลักษณะการไหลด้วย ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องของการวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วของไหล สามารถคำนวณความหนืดเชิงพลวัต (Dynamic Viscosity) และความหนืดจลน์ (Kinematic Viscosity) ได้จากสมการที่ (2-2) และ (2-3)

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2\text{-}2)$$

เมื่อ τ คือ ความเค้นเฉือน (Pa) หรือ (N/m^2)

μ คือ ความหนืดเชิงพลวัต $(Pa \cdot s)$ หรือ $(N \cdot s/m^2)$

$\frac{dv}{dy}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในทิศตั้งฉากกับการไหล

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2\text{-}3)$$

เมื่อ ν คือ ความหนืดจลน์ (m^2/s)

μ คือ ความหนืดเชิงพลวัต $(Pa \cdot s)$ หรือ $(N \cdot s/m^2)$

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

2.1.2.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของไหลที่ใช้เปรียบเทียบความหนาแน่นของสารกับความหนาแน่นของสารอ้างอิง โดยเป็นอัตราส่วนความหนาแน่นของไหลต่อความหนาแน่นของสารมาตรฐาน ความถ่วงจำเพาะจึงไม่มีหน่วยเนื่องจากเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณที่มีหน่วยเดียวกัน สำหรับของไหลที่เป็นของเหลว สารอ้างอิงที่มีการใช้งานกัน คือ น้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 4 องศา ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 1000 kg/m^3 และสำหรับของไหลที่เป็นก๊าซมักใช้อากาศเป็นสารอ้างอิง ซึ่งสามารถคำนวณความถ่วงจำเพาะได้ตามสมการที่ (2-4)

$$SG = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (2\text{-}4)$$

เมื่อ SG คือ ความถ่วงจำเพาะ

ρ คือ ความหนาแน่นของไหล (kg/m^3)

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศา $(\approx 1000\ kg/m^3)$

ความความถ่วงจำเพาะสามารถใช้บ่งบอกลักษณะของไหลได้อย่างง่าย คือ หากค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าหนึ่งแสดงว่าของไหลมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ หากค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าหนึ่งแสดงว่าของไหลมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ และหากค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับหนึ่งแสดงว่าของไหลมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำภายใต้สภาวะอ้างอิงเดียวกัน สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ความถ่วงจำเพาะไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อหลักการวัดความเร็วด้วยปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เนื่องจากระบบ UVP ใช้หลักการวัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคติดตามภายในของไหล แต่ความถ่วงจำเพาะมีความสัมพันธ์กับการเลือกชนิดของอนุภาคติดตาม โดยอนุภาคติดตามควรมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของไหล เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ตามการไหลได้อย่างถูกต้อง และยังลดการลอยตัวหรือการตกตะกอน ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำของการวัดความเร็วและการสร้างโพรไฟล์ความเร็วของของไหล

2.1.2.4 ความสามารถในการบีบอัดตัวของไหล (Compressibility of Fluid)

เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของไหลที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของไหลเมื่อได้รับแรงดันภายนอก หากความดันที่กระทำต่อของไหลเพิ่มขึ้น ปริมาตรของไหลจะมีแนวโน้มที่ลดลงในขณะที่ความหนาแน่นของไหลจะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่สัมพันธ์กับแรงดันที่กระทำ โดยปกติของไหลที่เป็นของเหลวมีความสามารถในการบีบอัดที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับของไหลที่เป็นก๊าซเนื่องจากความแตกต่างของโมเลกุล ซึ่งของเหลวมีโมเลกุลที่จัดเรียงตัวกันแบบใกล้ชิดและช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อย ส่งผลให้ของเหลวเมื่อได้รับความดันที่กระทำเพิ่มขึ้น ปริมาตร จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในส่วนของก๊าซนั้นมีความสามรถในการบีบอัดที่สูง เนื่องจากโมเลกุลมีระยะห่างการจัดเรียงตัวที่มาก ส่งผลให้ของเหลวเมื่อได้รับความดันที่กระทำเพิ่มขึ้น โมเลกุลจะถูกบีบอัดเข้าหากันทำให้ปริมาตรของก๊าซลดลงอย่างมาก ความสามารถในการบีบอัดตัวอธิบายได้ด้วยสัมประสิทธิ์การบีบอัดตัว ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2-5)

$$\beta = -\frac{1}{V}\frac{dV}{dP} \tag{2-5}$$

เมื่อ β คือ สัมประสิทธิ์การบีบอัดตัว (Pa^{-1})

V คือ ปริมาตรของไหล (m^3)

dV คือ การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (m^3)

dP คือ การเปลี่ยนแปลงของความดัน (Pa)

อีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้อธิบายการบีบอัดตัวของไหล คือ Bulk Modulus ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการถูกบีบอัด ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2-6)

$$K = -V\frac{dP}{dV} \tag{2-6}$$

เมื่อ K คือ Bulk Modulus (Pa)

V คือ ปริมาตรของของไหล (m^3)

dV คือ การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (m^3)

dP คือ การเปลี่ยนแปลงของความดัน (Pa)

ซึ่งความสามารถในการบีบอัดตัวของของไหลมีความเกี่ยวข้องโดยตรงและส่งผลต่อความเร็วของคลื่นเสียงที่แพร่กระจายในตัวกลางที่เป็นของเหลวในระบบ UVP สามารถอธิบายได้จากความเร็วเสียงในของไหลตามสมการที่ (2-7)

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \qquad (2\text{-}7)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วเสียงในของไหล $(\mathrm{m/s})$

K คือ Bulk Modulus (Pa)

ρ คือ ความหนาแน่นของไหล $(\mathrm{kg/m^3})$

จากสมการที่ (2-7) จะเห็นได้ว่าเมื่อของไหลมีค่า Bulk Modulus มากขึ้น ความเร็วเสียงก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ความสามารถในการบีบอัดตัวของไหลจึงส่งผลโดยตรงต่อการแพร่กระจายของคลื่นเสียง ที่มีผลต่อการคำนวณระยะทางจากเวลาการเดินทางของคลื่น (Time of Flight) และความแม่นยำของการวัดความเร็วด้วยเทคนิคดอปเพลอร์ในระบบ UVP

2.1.3 ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)

เป็นปริมาณไร้มิติที่ใช้สำหรับอธิบายลักษณะการไหลของของไหล โดยแสดงอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยของไหล (Inertial Force) กับ แรงหนืดภายในของไหล (Viscous Force) ซึ่งเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของของไหล ใช้สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลในระบบต่าง ๆ ตัวเลขเรย์โนลด์เกิดจากความสมดุลระหว่างแรงเฉื่อยและแรงหนืด หากแรงหนืดมีอิทธิพลมากกว่าแรงเฉื่อย การเคลื่อนที่ของไหลจะเป็นระเบียบ ชั้นของของไหลจะไหลขนานกันโดยเกิดการผสมกันน้อย หากแรงเฉื่อยมีอิทธิพลเหนือกว่าแรงหนืด ความไม่เสถียรของการไหลจะเพิ่มขึ้นทำให้เกิดกระแสไหลวนและการผสมของชั้นของไหลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ได้จากสมการที่ (2-8)

$$\mathrm{R_e} = \frac{\rho \mathrm{VD}}{\mu} = \frac{\mathrm{VD}}{\nu} \qquad (2\text{-}8)$$

เมื่อ $\mathrm{R_e}$ คือ จำนวนเรย์โนลด์

ρ คือ ความหนาแน่นของไหล $(\mathrm{kg/m^3})$

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล $(\mathrm{m/s})$

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)

μ คือ ความหนืดเชิงพลวัต $(\mathrm{Pa \cdot s})$ หรือ $(\mathrm{N \cdot s/m^2})$

ν คือ ความหนืดจลน์ $(\mathrm{m^2/s})$

สำหรับลักษณะการไหลภายในท่อกลม สามารถจำแนกลักษณะการไหลจากตัวเลขเรย์โนลด์ได้ดังต่อไปนี้

2.1.3.1 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re < 2,300) เป็นลักษณะการไหลที่อนุภาคของไหลเคลื่อนที่เป็นชั้นโดยแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่ขนานไปกับทิศทางการไหลมีการผสมกันระหว่างชั้นเพียงเล็กน้อยและการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีความต่อเนื่อง การถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างชั้นของไหลเกิดขึ้นจากแรงหนืดเป็นหลัก สำหรับการไหลภายในท่อ ความเร็วของไหลจะมีการกระจายตัวในลักษณะพาราโบลา (Parabolic Velocity Profile) โดยความเร็วสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณแกนกลางท่อ ในขณะที่ความเร็วของไหลบริเวณที่สัมผัสกับผิวท่อจะเป็นศูนย์ ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของไหลกับผิวของแข็งที่เป็นผนังท่อ ในบริเวณที่ห่างจากผนังท่อจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามลำดับจนถึงบริเวณแกนกลางท่อ

2.1.3.2 การไหลช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transitional Flow)

ตัวเลขเรย์โนลด์ (2,300 < Re < 4,000) เป็นลักษณะการไหลของอนุภาคที่อยู่ระหว่างการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ในช่วงนี้อนุภาคของไหลจะเริ่มสูญเสียการเคลื่อนที่แบบชั้นและเริ่มเกิดกระแสการไหลแบบวน ซึ่งทำให้การไหลเกิดการสลับกันไปมาและเริ่มเกิดการผสมกันระหว่างชั้นของไหล ปัจจัยที่ส่งผลทำให้การไหลเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ความเร็วของไหล ลักษณะรูปร่างของช่องทางการไหล ความหนืดของไหล ความขรุขระของผิวท่อ และการสั่นสะเทือนของระบบ สำหรับการไหลภายในท่อ ความเร็วของไหลจะเริ่มเบี่ยงเบนจากรูปพาราโบลาเปลี่ยนไปสู่ลักษณะที่ผสมกันมากขึ้น

2.1.3.3 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re > 4,000) เป็นลักษณะการไหลที่อนุภาคของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทางการไหลอย่างต่อเนื่อง ภายในของไหลจะเกิดการหมุนวนของกระแสการไหล การไหลลักษณะนี้จะเกิดเมื่อแรงเฉื่อยมีค่ามากกว่าแรงหนืด ลักษณะสำคัญคือ การเกิดกระแสไหลวน ขนาดต่าง ๆ ขึ้น ที่เคลื่อนที่และสลายตัวอยู่ตลอดเวลา ทำให้ชั้นของไหลเกิดการผสมกันในทิศทางขวางการไหล ลักษณะความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงในเชิงเวลาและตำแหน่งอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากอิทธิพลของกระแสไลวนที่เกิดขึ้นภายใน ดังนั้น การวิเคราะห์ลักษณะการไหลรูปแบบนี้มักใช้การวัดซ้ำหลายครั้งและการประมวลผลทางสถิติ

2.1.4 เวกเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector)

เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่ใช้อธิบายถึงการเคลื่อนที่อนุภาคของไหลที่ตำแหน่งหนึ่งในช่วงเวลาหนึ่ง โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญ 2 อย่าง คือ ขนาดของความเร็ว (Magnitude) และ ทิศทางของการเคลื่อนที่ (Direction) เวกเตอร์ความเร็วจึงสามารถบ่งบอกได้ว่าอนุภาคของไหลกำลังเคลื่อนที่เร็วแค่ไหนและกำลังเคลื่อนที่ไปในทิศทางใด ในมุมมองด้านพลศาสตร์ของไหล ของไหลประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องภายใต้อิทธิพลของแรงดัน ความหนืด

แรงโน้มถ่วง และแรงภายนอกอื่น ๆ ในเวลาช่วงหนึ่งอนุภาคของไหลจะเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งแหน่งหนึ่ง ทำให้สามารถกำหนดเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคนั้นได้

2.1.5 โพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector Profile)

เป็นการแสดงการกระจายตัวเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคของไหลในภาพรวม โดยการนำเวกเตอร์ความเร็วในแต่ล่ะตำแหน่งที่เวลาเดียวกันมารวมเป็นชุดโพรไฟล์ภายในบริเวณการไหล เป็นการแสดงรูปแบบของการกระจายตัวตลอดพื้นที่หรือหน้าตัดการไหล ทำให้สามารถอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของไหลได้ โพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหล เนื่องจากเวกเตอร์แต่ล่ะตัวแทนการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ตำแหน่งหนึ่งในช่วงเวลาหนึ่ง ความยาวลูกศรแสดงถึงขนาดความเร็วของอนุภาค หัวลูกศรแทนทิศทางการเคลื่อนที่อนุภาคหากโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดและทิศทางก็จะสะท้อนให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการไหล สำหรับลักษณะการไหลแบบราบเรียบเวกเตอร์บริเวณแกนกลางท่อจะมีขนาดยาวที่สุดและค่อยๆลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนังท่อ ในส่วนการไหลแบบปั่นป่วนจะมีการกระจายตัวของเวกเตอร์ความเร็วที่ซับซ้อนมากขึ้นโดยทิศทางและขนาดของเวกเตอร์ความเร็วจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถใช้โพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลได้ เช่น การหาตำแหน่งการหมุนวน การตรวจสอบความผิดปกติของการไหลจากการรั่วไหลหรือการอุดตัน ในระบบการไหลต่างๆ

2.1.6 การไหลของของเหลวบริเวณที่เกิดการรั่วไหล

การไหลของเหลวภายในท่อในสภาวะปกติโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วจะมีลักษณะเป็นระเบียบเวกเตอร์ความเร็วส่วนใหญ่ชี้ไปในทิศทางเดียวกับการไหลหรือแนวแกนท่อและมีความแตกต่างของขนาดความเร็วตามตำแหน่งภายในหน้าตัดท่อ โดยมีความเร็วสูงสุดบริเวรกึ่งกลางและลดลงใกล้ผนังท่อ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการรั่วไหล ของเหลวบางส่วนจะไหลออกผ่านจุดรั่วทำให้เกิดการเบี่ยงเบนเส้นทางการไหล ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วในบริเวณดังกล่าวและยังอาจทำให้เกิดเวกเตอร์หมุนวนแบบไหลย้อนกลับได้

2.2 คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Wave)

2.2.1 คลื่นเสียง (Sound Wave)

เป็นคลื่นกล (Mechanical Waves) ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของแหล่งกำเนิดและอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่คลื่น เช่น ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ การเกิดคลื่นเสียงเริ่มต้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงเกิดการสั่น เช่น ผลึกเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Crystal) เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้อนุภาคภายในผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างอย่างรวดเร็วตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้าและเกิดการสั่น ซึ่งจะทำให้อนุภาคของตัวกลางที่อยู่ติดกับแหล่งกำเนิดเสียงเกิดการเคลื่อนที่ตามแรงที่ได้รับ ในช่วงที่อนุภาคของแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่เข้าหาอนุภาคตัวกลาง

อนุภาคทั้งสองจะถูกอัดเข้าหากันจนเกิดบริเวณที่มีความดันสูง เรียกว่า บริเวณอัดตัว (Compression) ในช่วงที่อนุภาคของแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ออกจากอนุภาคตัวกลาง จะเกิดการกระจายตัวของอนุภาค ทำให้เกิดบริเวณความดันต่ำ เรียกว่า บริเวณเบาบาง (Rarefaction) การเกิดบริเวณทั้งสองนี้สลับกันอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการแพร่กระจายของคลื่นเสียงผ่านตัวกลาง ซึ่งการแพร่กระจายของคลื่นเสียงเกิดจากการถ่ายทอดพลังงานผ่านการสั่นของอนุภาคภายในตัวกลาง โดยอนุภาคไม่ได้เคลื่อนที่ไปพร้อมกับคลื่น แต่จะสั่นไปและกลับรอบตำแหน่งสมดุลของตัวอนุภาคเองและส่งต่อพลังงานไปยังอนุภาคข้างเคียงอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงจะขึ้นอยู่กับตัวกลางในการเคลื่อนที่แต่โดยส่วนใหญ่เป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ไปและกลับของอนุภาคตัวกลางขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ซึ่งเป็นลักษณะของคลื่นตามยาว

2.2.2 การแบ่งคลื่นเสียงตามย่านความถี่

การแบ่งประเภทของคลื่นเสียงตามย่านความถี่เป็นวิธีการจำแนกคลื่นเสียงที่ใช้กันในงานทางด้านฟิสิกส์และวิศวกรรม โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

2.2.2.1 คลื่นเสียงความถี่ต่ำ (Infrasonic Wave)

เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่า 20 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่ต่ำกว่าขีดจำกัดการรับรู้ของมนุษย์ คือ มนุษย์ไม่สามารถได้ยินเสียงความถี่นี้ได้ คลื่นเสียงความถี่ต่ำนี้เป็นคลื่นเสียงที่สามารถเดินทางได้ระยะไกลและมีการสูญเสียพลังงานน้อย เนื่องจากความยาวคลื่นมีค่ามาก จึงแพร่กระจายผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าคลื่นเสียงความถี่สูง สามารถพบเห็นคลื่นเสียงชนิดนี้ได้จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น แผ่นดินไหว คลื่นทะเล

2.2.2.2 คลื่นเสียงในช่วงการได้ยินของมนุษย์ (Audible Sound)

เป็นคลื่นเสียงที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ ซึ่งมีช่วงความถี่โดยประมาณ 20 Hz ถึง 2000 Hz เป็นช่วงที่หูของมนุษย์สามารถตอบสนองต่อแรงสั่นของคลื่นเสียงได้ สามารถพบเห็นคลื่นเสียงชนิดนี้ได้จากชีวิตประจำวัน เช่น การสื่อสารด้วยเสียง เสียงจากระบบเครื่องเสียงหรือเครื่องดนตรี

2.2.2.3 คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Wave)

คลื่นเสียงความถี่สูงหรืออัลตร้าโซนิคเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz ซึ่งเกินขอบเขตการรับรู้ของมนุษย์ คลื่นเสียงความถี่สูงมักถูกสร้างขึ้นโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ซึ่งเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลที่เป็นการสั่นเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสลับ ซึ่งเป็นวิธีการในการสร้างคลื่นเสียงความถี่สูงที่นิยมนำไปใช้กับงานทางด้านวิศวกรรม

พฤติกรรมของคลื่นเสียงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางและกระทบกับวัตถุหรืออนุภาคที่มีคุณสมบัติทางเสียงที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดการสะท้อน การหักเห การดูดกลืน และการกระเจิงของคลื่นเสียง ซึ่งสามารถนำพฤติกรรมเหล่านี้มาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปได้

2.2.3 ความยาวคลื่น (Wavelength)

เป็นระยะทางที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ได้ภายในหนึ่งรอบการสั่นของคลื่นหรือถ้ามองคลื่นเสียงในลักษณะของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal) คือระยะห่างระหว่างจุดสองจุดที่มีเฟสเดียวกันบนคลื่นเสียง เช่น ระยะห่างระหว่างจุดอัดที่อยู่ติดกันสองตำแหน่ง หรือ ระยะห่างระหว่างจุดเบาบางที่อยู่ติดกันสองตำแหน่ง ความยาวคลื่นเสียงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่ของคลื่นเสียงและความเร็วเสียงในตัวกลางนั้น ๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมาการที่ (2-9)

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2-9}$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น (m)

c คือ ความเร็วเสียงในตัวกลาง (m/s)

f คือ ความถี่ของคลื่นเสียง (Hz)

จากสมการ (2-9) จะเห็นได้ว่าหากความเร็วเสียงในตัวกลางคงที่ ความยาวคลื่นเสียงจะแปลผกผันกับความถี่ของคลื่นเสียง สำหรับระบบ UVP ความยาวคลื่นเสียงเป็นตัวแปลที่สำคัญ เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการวัดและความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution) ของระบบ โดยการเลือกใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงจะทำให้ความยาวคลื่นเสียงสั้น ส่งผลให้สามารถแยกตำแหน่งของอนุภาคที่สะท้อนคลื่นที่อยู่บริเวณใกล้กันได้ดีขึ้น และเพิ่มความละเอียดของการวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วของไหล แต่เมื่อความถี่ของคลื่นเสียงเพิ่มสูงขึ้น การดูดกลืนพลังงานของคลื่นเสียงในตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้ระยะการแพร่กระจายของคลื่นเสียงลดลงซึ่งส่งผลต่อระยะการตรวจวัด ดังนั้น การเลือกความถี่คลื่นเสียงให้เหมาะสมกับงานที่ใช้จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

2.2.4 ความเร็วเสียง (Speed of Sound)

เป็นอัตราเร็วที่คลื่นเสียงแพร่กระจายผ่านตัวกลางจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยเป็นคุณสมบัติของตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านไม่ใช่ความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เป็นตัวกลาง เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงเกิดการสั่น พลังงานจะถูกส่งต่อระหว่างอนุภาคตัวกลางจนเกิดการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ซึ่งคลื่นเสียงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกันตามชนิดของตัวกลาง ความเร็วในการแพร่กระจายของคลื่นเสียงจะขึ้นอยู่กับความหยืดหยุ่นและความหนาแน่นของตัวกลาง โดยตัวกลางที่มีความแข็งหรือความต้านทานการบีบอัดที่มากคลื่นเสียงจะแพร่กระจายได้ดีกว่า ดังนั้น ความเร็วเสียงจะแตกต่างกันในตัวกลางที่เป็น ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณความเร็วเสียงได้ตามสมาการที่ (2-10)

$$c = f\lambda \quad (2\text{-}10)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วเสียงในตัวกลาง (m/s)

λ คือ ความยาวคลื่น (m)

f คือ ความถี่ของคลื่นเสียง (Hz)

2.2.5 ความถี่คลื่นเสียง (Sound Frequency)

เป็นจำนวนรอบการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงต่อหนึ่งหน่วยเวลาโดยมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz : Hz) ซึ่ง 1 Hz หมายถึง การสั่นครบหนึ่งรอบของคลื่นเสียงภายใน 1 วินาที ความถี่เป็นตัวแปลพื้นฐานของคลื่นเสียงสำหรับใช้บ่งบอกการสั่นซึ่งจะคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ผ่านตัวกลางเดียวกัน ซึ่งสามารถคำนวณความถี่คลื่นเสียงได้ตามสมาการที่ (2-11)

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2\text{-}11)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของคลื่นเสียง (Hz)

c คือ ความเร็วเสียงในตัวกลาง (m/s)

λ คือ ความยาวคลื่น (m)

2.2.1 คาบเวลาคลื่นเสียง (Sound Wave Period)

เป็นระยะเวลาที่อนุภาคตัวกลางใช้ในการสั่นครบหนึ่งรอบของการเคลื่อนที่หรือคือช่วงเวลาที่คลื่นเสียงใช้ในการสร้างการสั่นครบหนึ่งรอบ เป็นตัวแปลพื้นฐานที่ใช้อธิบายลักษณะการสั่นของคลื่นเสียงโดยมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความถี่ของคลื่นเสียง ซึ่งสามารถคำนวณคาบเวลาคลื่นเสียงได้ตามสมาการที่ (2-12)

$$T = \frac{1}{f} \quad (2\text{-}12)$$

เมื่อ T คือ คาบเวลา (Period) (s)

f คือ ความถี่ของคลื่นเสียง (Hz)

2.3 การแพร่กระจายของคลื่นเสียง (Sound Wave Propagation)

เป็นกระบวนการที่พลังงานของคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางไปยังตำแหน่งต่าง ๆ อาศัยการสั่นของอนุภาคตัวกลางเป็นตัวถ่ายทอดพลังงานต่อเนื่องกัน ในระหว่างการแพร่กระจายของคลื่นเสียงเกิดปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ต่อไปนี้

2.3.1 ความดันเสียง (Acoustic Pressure)

เป็นการเปลี่ยนแปลงความดันในตัวกลางที่เกิดขึ้นจากการแพร่กระจายของคลื่นเสียง โดยเป็นผลมาจากการอัดตัวและขยายตัวของอนุภาคตัวกลางภายใต้ความดันบรรยากาศเมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่าน ส่งผลทำให้ความดันตัวกลางเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์สลับไปมา

ระหว่างค่าบวกและค่าลบอย่างต่อเนื่อง ค่าบวกแสดงถึงบริเวณที่อนุภาคตัวกลางถูกอัดตัวซึ่งจะมีค่าความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ส่วนค่าลบแสดงถึงบริเวณที่อนุภาคตัวกลางแยกตัวออกจากกันซึ่งจะมีค่าความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ความดันเสียงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง เมื่อค่าแอมพลิจุดการสั่นคลื่นเสียงเพิ่มขึ้น ค่าความดันเสียงจะเพิ่มขึ้นทำให้พลังงานของคลื่นเสียงและความเข้มของเสียง (Sound Intensity) เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อคุณภาพของคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับเมื่อกระทบกับอนุภาคหรือวัตถุ

2.3.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวกลาง (Particle Motion)

การเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวกลางเป็นผลมาจากการส่งผ่านพลังงานของคลื่นเสียงจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่รอบตำแหน่งสมดุลของอนุภาคตัวกลาง ซึ่งไม่ใช่การที่อนุภาคตัวกลางเคลื่อนที่ไปพร้อมกับคลื่นเสียง เมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่านตัวกลางพลังงานจะถูกส่งต่อจากอนุภาคตัวกลางหนึ่งไปยังอนุภาคถัดไปทำให้อนุภาคเกิดการสั่นและแกว่งไปมา อนุภาคที่กล่าวถึงหมายถึงโมเลกุลหรืออะตอมของตัวกลาง เช่น ในอากาศเมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่าน อนุภาคตัวกลางที่สั่นคือโมเลกุลของไนโตรเจนและออกซิเจน หรือในกรณีที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ อนุภาคตัวกลางที่สั่นจะเป็นโมเลกุลของน้ำโดยจะสั่นไปมาและส่งต่อพลังงานให้กับโมเลกุลข้างเคียงอย่างต่อเนื่อง

2.3.3 ความต้านทานทางเสียง (Acoustic Impedance)

เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลางที่ใช้อธิบายความต้านทานของตัวกลางต่อการแพร่กระจายของคลื่นเสียง เป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าเคลื่อนเสียงสามารถส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางวัสดุได้มากน้อยเพียงใดหรือบ่งบอกว่าจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงที่รอยต่อของตัวกลางมากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมาการที่ (2-13)

$$Z = \rho c \qquad (2\text{-}13)$$

เมื่อ Z คือ ความต้านทานทางเสียง $(\mathrm{kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}})$

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง $(\mathrm{kg/m^3})$

c คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง $(\mathrm{m/s})$

จากสมการที่ (2-13) จะเห็นได้ว่าความต้านทานทางเสียงจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางสองอย่าง คือ ความหนาแน่นของตัวกลางและความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง ถ้าทั้งสองอย่างนี้มีค่ามากจะทำให้ความต้านทานทางเสียงมีค่ามากตามไปด้วย เช่น ของแข็งจะมีความต้านทานทางเสียงมากกว่าของเหลวเนื่องจากของแข็งมีความหนาแน่นและความเร็วเสียงในตัวกลางที่มากกว่า ค่าความต้านทานทางเสียงเป็นสิ่งที่สำคัญเมื่อต้องพิจารณาการเดินทางของคลื่นเสียงจากตัวกลางวัสดุหนึ่งไปยังอีกวัสดุหนึ่ง เนื่องจากหากค่าความต้านทานทางเสียงของทั้งสองตัวกลางมีค่าใกล้เคียงกันคลื่นเสียงส่วนใหญ่สามารถที่จะเดินทางผ่านเข้าสู่ตัวกลางถัดไปได้และเกิดการสะท้อนเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าหาก

ความต้านทานทางเสียงของทั้งสองตัวกลางมีค่าที่แตกต่างกันมาก คลื่นเสียงส่วนใหญ่จะถูกสะท้อนกลับส่งผลให้พลังงานของคลื่นเสียงที่ส่งผ่านตัวกลางลดลงอย่างมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) ได้ตามสมการที่ (2-14)

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad (2\text{-}14)$$

เมื่อ R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

Z_1 คือ ความต้านทานทางเสียงของตัวกลางที่หนึ่ง

Z_2 คือ ความต้านทานทางเสียงของตัวกลางที่สอง

จากสมการที่ (2-14) จะเห็นได้ว่าเมื่อความต้านทานทางเสียงของทั้งสองตัวกลางมีค่าเท่ากันจะไม่มีการสะท้อนของคลื่นเสียง แต่หากความต้านทานทางเสียงแตกต่างกันมากจะเกิดการสะท้อนกลับ จากหลักการนี้เป็นเหตุผลที่สำคัญที่ทำให้การนำคลื่นเสียงไปใช้กับงานทางด้านต่าง ๆ ด้วยการใช้ทรานสดิวเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงจำเป็นต้องใช้สารเชื่อมต่อคลื่นเสียง (Acoustic Coupling Medium) เช่น เจลอัลตราซาวนด์ น้ำ หรือซิลิโคน เพื่อกำจัดชั้นอากาศระหว่างหัววัดทรานสดิวเซอร์กับผิวของวัสดุตัวกลางเพื่อช่วยเพิ่มการส่งผ่านพลังงานคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

2.3.4 การลดทอนของคลื่นเสียง (Attenuation)

เป็นกระบวนการที่พลังงานหรือแอมพลิจูดของคลื่นเสียงค่อย ๆ ลดลงเมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคตัวกลาง ส่งผลให้ความเข้มของคลื่นเสียงลดลงตามระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ แต่ความถี่ของคลื่นเสียงยังเท่าเดิม เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยมีสาเหตุมาจากการสูญเสียพลังงานระหว่างการแพร่กระจายของคลื่นเสียงที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานของตัวกลาง เมื่อคลื่นเสียงแพร่กระจายในของเหลว อนุภาคตัวกลางจะเกิดการสั่นทำให้สูญเสียพลังงานบางส่วน เนื่องจากแรงเสียดทานภายในอนุภาคตัวกลางที่เกิดจากการเคลื่อนที่และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ส่งผลให้พลังงานของคลื่นเสียงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเคลื่อนที่

2.3.5 การสะท้อนของคลื่นเสียง (Reflection)

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางและกระทบกับรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิดที่มีคุณสมบัติทางเสียงที่เป็นความต้านทานทางเสียงที่แตกต่างกัน ส่งผลให้คลื่นเสียงบางส่วนถูกสะท้อนกลับและอีกบางส่วนสามารถผ่านเข้าตัวกลางถัดไปได้ ปริมาณพลังงานคลื่นเสียงที่สะท้อนกับขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความต้านทานทางเสียง โดยความแตกต่างมากจะเกิดการสะท้อนมาก หากความแตกต่างน้อยจะเกิดการสะท้อนน้อยและยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่ส่งผลต่อการสะท้อนของคลื่นเสียง เช่น ความราบเรียบของพื้นผิวตัวกลาง มุมตกกระทบและความถี่ของคลื่นเสียง ดังนั้น การนำคลื่นเสียงไปใช้กับงานทางด้านต่างๆ ควรพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้

2.3.6 การหักเหของคลื่นเสียง (Refraction)

เป็นปรากฏการณ์ที่แนวการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงเปลี่ยนทิศทางไปเมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความเร็วเสียงเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วของคลื่นเสียงเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน หรือเปลี่ยนแปลงตัวกลางในการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง การหักเหของเคลื่อนเสียงนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะทิศทางการเคลื่อนที่แต่ความถี่ของคลื่นเสียงยังคงเท่าเดิม

2.3.7 การแทรกสอดของคลื่นเสียง (Interference)

เป็นปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นเสียงตั้งแต่สองคลื่นขึ้นไปเคลื่อนที่มาพบกันภายในตัวกลางเดียวกันและภายในช่วงเวลาเดียวกัน ทำให้เกิดการรวมกันของพลังงานหรือแอมพลิจูดของคลื่นเสียง โดยค่าแอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่ตำแหน่งใดตำแหน่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของคลื่นเสียงทั้งหมดที่มารวมกันที่จุดนั้น ผลรวมของแอมพลิจูดอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของเฟส (Phase) ระหว่างคลื่นแต่ละคลื่น ซึ่งสามารถแบ่งการแทรกสอดออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การแทรกสอดแบบเสริม (Constructive Interference) และการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive Interference) การแทรกสอดแบบเสริมจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่มาพบกันที่จุดหนึ่งนั้นมีเฟสสอดคล้องกัน (In Phase) ยกตัวอย่าง ในกรณีคลื่นเสียงมีสองคลื่น คือ ยอดคลื่นตรงกับยอดคลื่น และท้องคลื่นตรงกับท้องคลื่น ส่งผลให้แอมพลิจูดรวมเพิ่มขึ้น ส่วนการแทรกสอดแบบหักล้างจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่มาพบกันที่จุดหนึ่งนั้นมีเฟสตรงข้ามกัน (Out of Phase) ยกตัวอย่าง ในกรณีคลื่นเสียงมีสองคลื่น คือ ยอดคลื่นของคลื่นหนึ่งตรงกับท้องคลื่นของอีกคลื่นหนึ่ง ส่งผลให้แอมพลิจูดรวมลดลง

2.3.8 การกระเจิงของคลื่นเสียง (Scattering)

เป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นเสียงเปลี่ยนทิศทางการแพร่กระจายเมื่อการเดินทางของคลื่นเสียงกระทบกับวัตถุที่ปะปนอยู่กับตัวกลางหรือเป็นความไม่สม่ำเสมอที่อยู่ภายในตัวกลาง เช่น อนุภาคติดตาม อนุภาคแขวนลอย ฟองอากาศ หรือพื้นผิวขรุขระ โดยพลังงานของคลื่นเสียงที่ตกกระทบจะไม่ได้สะท้อนกลับทั้งหมดในทิศทางเดียว แต่แบ่งออกหลายส่วน คือ ส่วนที่สะท้อนกลับ ส่วนที่ส่งผ่าน ส่วนที่ถูกดูดกลืน และส่วนที่กระเจิงออกไปในหลายๆทิศทาง ซึ่งลักษณะทิศทางและปริมาณการกระเจิงของคลื่นเสียงจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติตัวกลาง ขนาด รูปร่าง ของวัตถุที่เป็นตัวทำให้เกิดการกระเจิง และความถี่ของคลื่นเสียงด้วย

2.3.9 การดูดกลืนพลังงานของคลื่นเสียง (Absorption)

เป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานของคลื่นเสียงค่อย ๆ ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปแบบอื่นโดยส่วนใหญ่นั้นถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในอนุภาคตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่าน สาเหตุของการดูดกลืนพลังงานของคลื่นเสียงเกิดจากการที่อนุภาคตัวกลางเกิดการสั่นตามการเคลื่อนที่

ของคลื่นเสียงไปและกับอย่างต่อเนื่อง เกิดแรงเสียดทานภายในทำให้พลังงานของคลื่นเสียงเปลี่ยนเป็นความร้อน ส่งผลให้พลังงานของคลื่นเสียงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เป็นหนึ่งในกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนและการกระเจิงของคลื่นเสียง การดูดกลืนพลังงานของคลื่นเสียงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติตัวกลางหลายอย่าง เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ความยืดหยุ่นของตัวกลาง และความถี่ของคลื่นเสียงก็เป็นปัจจัยที่สำคัญ

2.4 อนุภาคติดตามการไหล (Tracer Particle)

เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่ถูกเติมลงไปในของไหล เช่น เม็ดพลาสติกชนิด โพลิสไตรีน (Polystyrene) ไนลอน (Nylon) หรือโพลิเอทิลีน (Polyethylene) เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการติดตามลักษณะการเคลื่อนที่ของเหลว โดยอนุภาคเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการไหลของของเหลว ทำให้สามารถใช้เป็นตัวแทนของความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของเหลวในแต่ละตำแหน่งได้ สำหรับระบบ UVP อนุภาคติดตามการไหลทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นเสียง เมื่อทรานสดิวเซอร์ส่งคลื่นเสียงความถี่สูงเข้าสู่ของเหลว คลื่นเสียงจะเดินทางไปกระทบกับอนุภาคติดตามและเกิดการสะท้อนกลับมายังทรานสดิวเซอร์ ซึ่งจะนำสัญญาณสะท้อนนั้นไปประมวลผลเพื่อหาทิศทางและความเร็วของของเหลวต่อไป

2.4.1 การเลือกอนุภาคติดตามการไหล (Tracer Particle Selection)

เป็นขั้นตอนที่สำคัญของการวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วของของเหลวด้วยเทคนิค UVP เนื่องจากอนุภาคติดตามทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการสะท้อนคลื่นเสียง เพื่อให้สามารถติดตามการเคลื่อนที่ได้อย่างถูกต้องควรเลือกอนุภาคติดตามให้เหมาะสมกับการวัด สิ่งที่สำคัญในการเลือกอนุภาคติดตามการไหลคืออนุภาคติดตามต้องสามารถเคลื่อนที่ตามการไหลของของเหลวได้อย่างใกล้เคียงที่สุด อนุภาคติดตามต้องมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามการไหลได้รวดเร็วโดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคติดตามต้องไม่เฉื่อยจนทำให้ความเร็วของอนุภาคติดตามแตกต่างจากความเร็วจริงของของเหลว คุณสมบัติดังกล่าวจะพิจารณาจาก เลขสโตกส์ (Stokes Number) ซึ่งเป็นเลขที่บ่งบอกถึงความสามารถในการติดตามการไหล โดยเมื่อเลขสโตกส์มีค่ามากอนุภาคติดตามจะติดตามการไหลได้ไม่ดี ความหนาแน่นของอนุภาคติดตามก็เป็นปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากความแตกต่างความหนาแน่นระหว่างอนุภาคติดตามและของเหลวจะส่งผลต่อแรงลอยตัวและแรงโน้มถ่วง หากอนุภาคติดตามมีความหนาแน่นสูงกว่าของเหลวมากจนเกินไป อนุภาคติดตามจะเกิดการตกตะกอน แต่หากมีความหนาแน่นต่ำกว่าของเหลวมากจนเกินไป อนุภาคติดตามจะลอยขึ้นสู่ผิวของของเหลว ทำให้อนุภาคติดตามกระจายตัวไม่สม่ำเสมอภายในบริเวณที่ต้องการวัด ส่งผลต่อคุณภาพของคลื่นเสียงที่สะท้อนจากอนุภาคติดตามที่ได้รับ ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของความถูกต้องในการวัด จึงควรเลือกอนุภาคติดตามให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลวเพื่อลดผลกระทบจากแรงลอยตัวและแรงโน้มถ่วงทำให้อนุภาคติดตามสามารถแขวนลอยอยู่

ในตัวกลางได้นาน นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคติดตามก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่ต้องพิจารณา อนุภาคติดตามขนาดเล็กจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของการไหลได้รวดเร็ว แต่หากเล็กเกินไปอาจทำให้คลื่นเสียงที่สะท้อนมีแอมพลิจูดที่เล็กเกินไป ถ้าอนุภาคติดตามมีขนาดใหญ่ก็จะสามารถสะท้อนคลื่นเสียงได้ดี แต่จะมีมวลมากขึ้น สงผลทำให้เกิดความเฉื่อยและติดตามการไหลได้ไม่ดี ดังนั้น การเลือกขนาดอนุภาคจึงต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างคุณภาพของสัญญาณสะท้อนและความสามารถในการติดตามการไหลด้วย

2.4.2 ความเข้มข้นของอนุภาคติดตามการไหล (Tracer Particle Concentration)

เป็นปริมาณหรือจำนวณอนุภาคติดตามที่กระจายตัวอยู่ภายในของไหล สำหรับการวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วของของเหลวด้วยเทคนิค UVP ความเข้มข้นของอนุภาคติดตามถือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณสะท้อนของคลื่นเสียง หากความเข้มข้นของอนุภาคติดตามต่ำเกินไป จำนวนอนุภาคติดตามที่สะท้อนคลื่นจะไม่เพียงพอทำให้สัญญาณสะท้อนมีแอมพลิจูดต่ำที่อาจส่งผลทำให้การวัดความเร็วในบางตำแหน่งเกิดความผิดพลาด แต่หากความเข้มข้นของอนุภาคติดตามมากเกินไปแม้ว่าสัญญาณสะท้อนจะมีแอมพลิจูดที่มากขึ้น แต่นุภาคติดตามจำนวนมากจะทำให้เกิดการกระเจิงของคลื่นเสียงหลายครั้ง ซึ่งอาจทำให้เกิดการลดทอนพลังงานคลื่นเสียงส่งผลให้คลื่นเสียงเดินทางได้ในระยะทางที่สั่นลง

2.5 สัญญาณสะท้อน (Echo Signal)

เป็นสัญญาณของคลื่นเสียงที่เดินทางกลับมายังตัวรับสัญญาณภายหลังจากคลื่นเสียงที่ถูกส่งออกจากทรานสดิวเซอร์และเคลื่อนที่ไปกระทบกับตัวสะท้อนที่อยู่ภายในตัวกลาง เช่น อนุภาคแขวนลอยอนุภาคติดตาม หรือวัตถุที่มีค่าความต้านทานทางเสียงที่แตกต่างกัน เมื่อคลื่นเสียงตกกระทบกับอนุภาคหรือวัตถุเหล่านั้น พลังงานของคลื่นเสียงส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมายังแหล่งกำเนิดและอีกบางส่วนจะส่งผ่านตัวสะท้อนไป ซึ่งอาจเกิดการลดทอนพลังงานงานก่อนที่จะผ่านออกไป จากพลังงานของคลื่นเสียงที่สะท้อนส่งผลให้ทรานสดิวเซอร์สามารถวัดคลื่นเสียงสะท้อนและแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อใช้ในการประมวลผลต่อไปได้

2.5.1 แอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อน (Echo Amplitude)

เป็นขนาดหรือความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากสัญญาณสะท้อนของคลื่นเสียง แอมพลิจูดจะแสดงถึงระดับพลังงานของคลื่นสะท้อน ลักษณะและแอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางและตัวสะท้อนหลายอย่าง ได้แก่ ความแตกต่างของความต้านทานทางเสียงของตัวกลางและตัวสะท้อน ขนาด รูปร่าง ความเข้มข้น และการกระจายตัวของอนุภาคที่เป็นตัวสะท้อน ระยะทางที่คลื่นเสียงเดินทาง การลดทอนคลื่นเสียง การกระเจิงคลื่นเสียง รวมไปถึงการตั้งค่ากำลังส่งของแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงด้วย

2.5.2 เวลาการเดินทางของคลื่น (Time of Flight)

เป็นระยะเวลาที่คลื่นเสียงใช้ในการเคลื่อนที่จากทรานสดิวเซอร์ที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงไปยังวัตถุหรืออนุภาคที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นเสียงและเดินทางกลับมายังทรานสดิวเซอร์ที่เป็นตัวตรวจวัดคลื่นเสียงซึ่งอาจเป็นตัวเดียวกันหรือแยกกันก็ได้ เวลาการดินทางของคลื่นจึงเป็นตัวแปลที่สามารถบ่งบอกถึงตำแหน่งของตัวสะท้อนภายในตัวกลางได้ การพิจารณาหาตำแหน่งของตัวสะท้อนเนื่องจากคลื่นเสียงเดินทางทั้งไปและกลับ ซึ่งเป็นระยะทางสองเท่าของระยะทางจากทรานสดิวเซอร์ถึงตำแหน่งของตัวสะท้อน ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของตัวสะท้อนกับเวลาเดินทางของคลื่นสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (2-15)

$$x = \frac{ct}{2} \tag{2-15}$$

เมื่อ x คือ ระยะจากทรานสดิวเซอร์ถึงตำแหน่งตัวสะท้อน (m)

c คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง (m/s)

t คือ เวลาที่คลื่นเสียงเดินทางไปและกลับ (s)

จากสมการที่ (2-15) จะเห็นได้ว่าเมื่อรู้ความเร็วเสียงของตัวกลางของเหลวและสามารถวัดค่าเวลาการเดินทางของคลื่นไปและกลับได้ ก็จะสามารถคำนวณตำแหน่งของตัวสะท้อนคลื่นเสียงได้ ซึ่งความเร็วเสียงของตัวกลางของเหลวจะต้องคงที่ตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

2.5.3 เฟสของสัญญาณสะท้อน (Echo Signal Phase)

เป็นตำแหน่งเชิงมุมของคลื่นเสียงสะท้อนภายในหนึ่งคาบของสัญญาณคลื่นเสียงเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณคลื่นเสียงที่ถูกส่งออกไปจากแหล่งกำเนิดเสียง โดยเฟสสัญญาณสะท้อนของคลื่นเสียงจะมีเฟสเท่าเดิมเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงและตัวสะท้อนหยุดหนึ่งและจะมีการเปลี่ยนเฟสเมื่อเกิดการเคลื่อนที่

2.5.4 ความถี่ของสัญญาณสะท้อน (Echo Frequency)

เป็นความถี่ของคลื่นเสียงที่วัดได้หลังจากคลื่นเสียงเดินทางจากทรานสดิวเซอร์ที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียงไปกระทบกับตัวสะท้อนภายในของเหลวและสะท้อนกลับมายังทรานสดิวเซอร์ที่เป็นตัวรับสัญญาณ โดยความถี่ของสัญญาณสะท้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากความถี่คลื่นเสียงที่ส่งออกไปหรือไม่ ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของตัวสะท้อนและทรานสดิวเซอร์ หากตัวสะท้อนและทรานสดิวเซอร์อยู่กับถี่ ความถี่ของสัญญาณสะท้อนจะมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ของคลื่นเสียงที่ส่งออกไป

2.5.5 สัญญาณรบกวน (Noise)

เป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการซึ่งแทรกซ้อนอยู่ในสัญญาณสะท้อนที่ต้องการวัด ส่งผลให้คุณภาพของข้อมูลที่ได้จากสัญญาณสะท้อนลดลงและทำให้การวิเคราะห์ผลคลาดเคลื่อนจากสภาพจริง

โดยสัญญาณรบกวนสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายแหล่ง ทั้งจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทาง สภาพแวดล้อม รวมถึงกระบวนการประมวลผลสัญญาณ

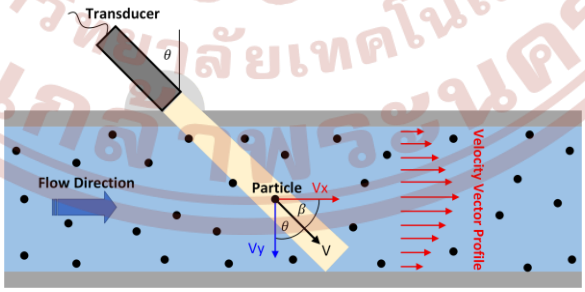
2.6 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect)

เป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ความถี่ของคลื่นที่ผู้สังเกตรับรู้เปลี่ยนแปลงไปจากความถี่ที่แหล่งกำเนิดคลื่นปล่อยออกมา เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นและผู้สังเกต หรือระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นกับวัตถุที่ทำหน้าที่สะท้อนคลื่น แม้ว่าความถี่ของแหล่งกำเนิดคลื่นที่สร้างขึ้นจะคงที่ หากทั้งสองคลื่อนที่เข้าหากันความถี่ที่ผู้สังเกตรับรู้หรือตรวจวัดได้จะสูงกว่าความถี่เดิม แต่หากเคลื่อนที่ออกจากกันความถี่ที่ผู้สังเกตรับรู้หรือวัดได้จะลดลงจากความถี่เดิม ปรากฏการณ์นี้สามารถเกิดขึ้นได้กับคลื่นทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นคลื่นกลหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับคลื่นเสียงปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เกิดจากการที่แนวหน้าคลื่นถูกอัดเข้าหากันเมื่อแหล่งกำเนิดและวัตถุเคลื่อนที่เข้าหากันทำให้ความยาวคลื่นลดลงและความถี่ที่วัดได้เพิ่มขึ้น และเมื่อเคลื่อนที่ออกจากกันแนวหน้าคลื่นจะห่างออกจากกัน ส่งผลให้ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นและความถี่ที่วัดได้ลดลง แต่ความเร็วของคลื่นเสียงยังมีค่าเท่าเดิมหากคุณสมบัติของตัวกลาง เช่น อุณหภูม ความดัน ไม่เปลี่ยนแปลง

2.7 เทคนิคการส่งพัลส์ซ้ำ (Pulse Repetition Technique)

เป็นเทคนิคการส่งคลื่นเสียงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากแหล่งกำเนิดเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ (Pulse) อย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการส่งที่คงที่ จากนั้นจะรอรับสัญญาณสะท้อนที่เดินทางกลับมาจากการสะท้อนวัตถุหรือตัวสะท้อน ก่อนที่จะส่งคลื่นพัลส์ถัดไป กระบวนการจะทำงานสลับไปมาระหว่างการส่งและรับคลื่น เทคนิคนี้ทำให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณสะท้อนในแต่ละช่วงเวลาได้ และนำไปวิเคราะห์เพื่อดูพฤติกรรมของวัตถุหรือตัวสะท้อนต่อไปได้

2.8 Ultrasonic Velocity Profiler (UVP)



ภาพที่ 2-2 หลักการพื้นฐานเทคนิค UVP แบบ Single-Element

2.8.1 หลักการพื้นฐาน UVP แบบ Single-Element

เป็นเทคนิคการวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วของของเหลวแบบไม่รุกล้ำ ใช้ทรานสดิวเซอร์เพียงตัวเดียวทำหน้าที่ปล่อยและรับคลื่นเสียงในตัวเดียวกัน โดยอาศัยหลักการของคลื่นเสียงความถี่สูง ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ และเทคนิคการส่งพัลส์ซ้ำ เพื่อวัดเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคติดตาม

การไหลที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับของเหลว หลักการทำงานของเทคนิค UVP เริ่มต้นจากทรานสดิวเซอร์ที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงซึ่งเป็นแบบชุดพัลส์เข้าไปในของเหลวที่มีอนุภาคติดตามผสมอยู่ หลังจากนั้นจะหยุดปล่อยคลื่นเสียงเพื่อรอรับสัญญาณสะท้อน คลื่นเสียงที่ถูกปล่อยออกมาจะเดินทางผ่านตัวกลางด้วยความเร็วเสียงของตัวกลางนั้น ๆ เมื่อคลื่นเสียงกระทบกับอนุภาคติดตามที่กระจายตัวอยู่ภายในของเหลวจะเกิดการกระเจิงและการสะท้อนกลับมายังทรานสดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่รอรับสัญญาณ โดยเวลาการเดินทางของคลื่นไปและกลับจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณตำแหน่งของอนุภาคติดตามที่สะท้อนตามแนวลำคลื่น ทำให้สามารถแบ่งพื้นที่การวัดออกเป็นช่วงย่อย ๆ ได้ ซึ่งแต่ละช่วงแทนตำแหน่งที่แตกต่างกันภายในของเหลว หลังจากได้รับสัญญาณสะท้อนจากแต่ละตำแหน่งจากการปล่อยคลื่นเสียงแบบพัลส์ชุดแรกออกไป ระบบจะส่งคลื่นเสียงแบบพัลส์ซ้ำด้วยความถี่คงที่ และเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณสะท้อนระหว่างพัลส์ที่ส่งต่อเนื่องกัน หากอนุภาคติดตามมีการเคลื่อนที่ความถี่ของสัญญาณสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงจากความถี่ที่ส่งออกไปตามหลักของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ ซึ่งเรียกว่า Doppler Frequency Shift ความถี่ดอปเพลอร์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับองค์ประกอบความเร็วของอนุภาคติดตามในทิศทางของแนวลำคลื่นเสียงและการเปลี่ยนแปลงความถี่จะเกิดขึ้นสองครั้งระหว่างการเดินทางของคลื่นเสียงเมื่อปล่อยจากทรานสดิวเซอร์ไปยังอนุภาคติดตาม และระหว่างการสะท้อนจากอนุภาคติดตามมายังทรานสดิวเซอร์ ดังนั้น จึงสามารถคำนวณหาความถี่ดอปเพลอร์ที่เกิดขึ้นและนำไปคำนวณความเร็วของอนุภาคติดตามในแต่ละตำแหน่งซึ่งเป็นตัวแทนความเร็วของเหลวในการไหลได้ตามสมการที่ (2-16) และ (2-17)

$$f_D = f_r - f_0 = \frac{2f_0V}{c} \tag{2-16}$$

เมื่อ f_D คือ ความถี่ดอปเพลอร์ (Hz)

f_r คือ ความถี่ของสัญญาณสะท้อนที่วัดได้ (Hz)

f_0 คือ ความถี่ของคลื่นเสียงที่ปล่อยออกจากทรานสดิวเซอร์ (Hz)

V คือ ความเร็วของอนุภาคติดตาม ตามแนวคลื่น (m/s)

c คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง (m/s)

$$V_x = V\sin\theta = \frac{cf_D}{2f_0}\sin\theta \tag{2-17}$$

เมื่อ V_x คือ ความเร็วของอนุภาคติดตาม ตามแนวการเคลื่อนที่ของเหลว (m/s)

V คือ ความเร็วของอนุภาคติดตาม ตามแนวคลื่น (m/s)

c คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง (m/s)

f_D คือ ความถี่ดอปเพลอร์ (Hz)

f_0 คือ ความถี่ของคลื่นเสียงที่ปล่อยออกจากทรานสดิวเซอร์ (Hz)

θ คือ มุมระหว่างทิศทางแนวลำคลื่นเสียงกับแนวตั้งฉากการไหล (°)

จากสมการที่ (2-16) และ (2-17) จะเห็นได้ว่าความถี่ดอปเพลอร์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของอนุภาคติดตาม เมื่อความเร็วของอนุภาคติดตามเพิ่มขึ้นความถี่ดอปเพลอร์จะเพิ่มขึ้น และมุมระหว่างทิศทางการไหลกับแนวลำคลื่นเสียง β ก็ส่งผลต่อความถี่ดอปเพลอร์ด้วย เมื่อมุมมีทิศทางเดียวกับแนวลำคลื่นเสียงหรือ 0 องศา จะทำให้ความถี่ดอปเพลอร์มีค่าสูงสุด แต่ถ้ามุมมีทิศทางตั้งฉากกับแนวลำคลื่นเสียงหรือ 90 องศา จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ดอปเพลอร์ เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคติดตามในแนวลำคลื่นเสียง ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (2-18)

$$V = V_x \cos\beta \qquad (2\text{-}18)$$

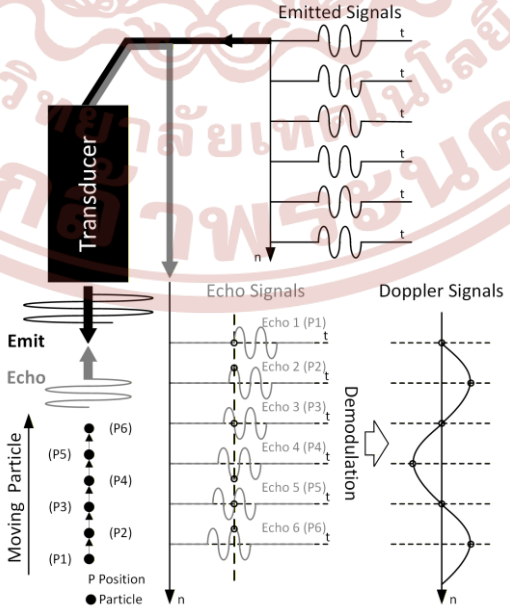
เมื่อ V คือ ความเร็วของอนุภาคติดตาม ตามแนวคลื่น (m/s)

V_x คือ ความเร็วของอนุภาคติดตาม ตามแนวการเคลื่อนที่ของเหลว (m/s)

β คือ มุมระหว่างทิศทางแนวลำคลื่นเสียงกับทิศทางการไหล (°)

เมื่อนำเวกเตอร์ความเร็วของตำแหน่งทุกช่วงมารวมผลลัพธ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันจะเป็นโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็ว ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทางของของเหลวตลอดแนวลำคลื่นเสียงที่สามารถนำมาศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ ซึ่งในเทคนิค UVP ไม่ได้วัดความถี่ดอปเพลอร์จากคลื่นสะท้อนโดยตรง แต่จะใช้การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณสะท้อนด้วยเทคนิคการส่งพัลส์ซ้ำเพื่อประมาณค่าความถี่ดอปเพลอร์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ต่อไป

2.8.2 สัญญาณดอปเพลอร์ (Doppler Signal)



ภาพที่ 2-3 กระบวนการประมวลผลสัญญาณดอปเพลอร์

เป็นสัญญาณที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคติดตามการไหล ระหว่างการส่งพัลส์แต่ล่ะครั้งอนุภาคติดตามจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับของไหลทำให้ระยะทางระหว่างทรานสดิวเซอร์กับอนุภาคติดตามเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เฟสของสัญญาณสะท้อนในแต่ละพัลส์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การสะสมค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสจากพัลส์หลายชุดจะทำให้เกิดสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อนำเฟสของสัญญาณสะท้อนจากพัลส์ทั้งหมดมาเรียงตามเวลาจะได้ลำดับข้อมูลเชิงเวลาที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสอย่างต่อเนื่องซึ่ง คือ สัญญาณดอปเพลอร์ สัญญาณนี้มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ดอปเพลอร์ และมีแอมพลิจูดที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของคลื่นเสียงจากสัญญาณสะท้อนอนุภาคติดตามที่ได้รับ

2.8.3 โครงสร้างของระบบ UVP

2.8.3.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulser)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบพัลส์ที่มีช่วงเวลาสั่นและแอมพลิจูดสูงเพื่อกระตุ้นทรานสดิวเซอร์ให้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นเสียงความถี่สูง ในการทำงานเบื่องต้นเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์จะได้รับสัญญาณควบคุมจากหน่วยประมวลผล จากนั้นจะสร้างสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดแอมพลิจูดตามที่ต้องการขึ้นอยู่กับลักษณะของทรานสดิวเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน สัญญาณพัลส์จะมีความกว้างของพัลส์อยู่ในช่วงระดับนาโนวินาทีถึงไมโครวินาที เพื่อให้สามารถกระตุ้นผลึกเพียโซอิเล็กทริกภายในตัวทรานสดิวเซอร์ให้เกิดการสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อสร้างคลื่นเสียงให้มีความถี่ตามที่ออกแบบไว้ เมื่อทรานสดิวเซอร์ได้รับสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้า ผลึกเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดการขยายและหดตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการปล่อยคลื่นเสียงเข้าสู่ตัวกลางของเหลว เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มีความสำคัญในการกำหนดช่วงเวลาหรือความถี่ของการส่งคลื่นเสียงความถี่สูงในแต่ละครั้งของเทคนิคการส่งพัลส์ซ้ำ ปัจจุบันเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มักจะทำงานร่วมกับเครื่องรับสัญญาณภายในตัวเดียวกัน ซึ่งทำหน้าที่แยกช่วงเวลาการส่งและรับสัญญาณด้วยการสลับการทำงานการส่งสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าสูงและรับสัญญาณสะท้อน

2.8.3.2 เครื่องรับสัญญาณ (Receiver)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณสะท้อนจากกระบวนการที่ทรานสดิวเซอร์ที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง ปล่อยคลื่นเสียงเข้าสู่ของเหลวไปตกกระทบกระทบกับอนุภาคติดตามการไหลและสะท้อนกลับมายังทรานสดิวเซอร์ที่เป็นตัวรับคลื่นเสียง ซึ่งเครื่องรับสัญญาณจะแปลงคลื่นเสียงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ภายในเครื่องรับสัญญาณจะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ กรองสัญญาณ และปรับสภาพสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีคุณภาพเพียงพอสำหรับการแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลและนำไปประมวลผลต่อไป

2.8.3.3 ทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งเพื่อให้สามารถสร้างหรือวัดสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ทางกายภาพได้ สำหรับระบบ UVP ทรานสดิวเซอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นคลื่นเสียงความถี่สูงและยังสามารถแปลงคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับมาให้เป็นแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งทรานสดิวเซอร์อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุบางชนิด โดยเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์เข้าสู้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก วัสดุจะเกิดการยืดและหดตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการสั่นเชิงกลและปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงออกสู่ตัวกลาง ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผกผัน ในทางกลับกัน เมื่อคลื่นเสียงสะท้อนจากอนุภาคติดตามกลับมายังทรานสดิวเซอร์ แรงดันเชิงกลที่กระทำต่อหน้าสัมผัสพื้นผิววัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังวงจรรับสัญญาณและระบบประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

2.8.3.4 วงจรแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัล (Digitizer)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อให้คอมพิวเตอร์หรือหน่วยประมวลผลสามารถจัดเก็บ วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ วงจรแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัลประกอบด้วยวงจรเก็บตัวอย่างสัญญาณและตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งทำงานร่วมกันในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณและแปลงแรงดันไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา สำหรับระบบ UVP แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณสะท้อนผ่านทรานสดิวเซอร์จะถูกแปลงข้อมูลผ่านวงจรแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป

2.8.4 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเทคนิค UVP

2.8.4.1 ความถี่พื้นฐาน (Basic Frequency)

เป็นความถี่ที่ทรานสดิวเซอร์ได้รับการออกแบบให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดยเป็นความถี่ที่ใช้สร้างพัลส์คลื่นเสียงและส่งผ่านเข้าสู่ของเหลว ความถี่พื้นฐานมีผลโดยตรงต่อความยาวคลื่นเสียง ที่ส่งผลต่อความสามารถของคลื่นเสียงในการส่งผ่านอนุภาคติดตามและความล่ะเอียดเชิงพื้นที่ของการวัดสำหรับระบบ UVP ความถี่พื้นฐานที่มีการใช้งานมักอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 10 MHz ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานวัดและชนิดของของเหลว

2.8.4.2 แอมพลิจูดของพัลส์ (Pulse Amplitude)

เป็นขนาดสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดให้กับเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับการสร้างสัญญาณพัลส์ในแต่ล่ะช่วงเวลาของการส่งสัญญาณ โดยเป็นตัวบ่งบอกระดับพลังงานของสัญญาณพัลส์ที่ถูกส่งออกจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังทรานสดิวเซอร์เพื่อเปลี่ยนเป็นคลื่นเสียงความถี่สูงที่แพร่กระจายเข้าสู่ของเหลว หากเลือกค่าแอมพลิจูดต่ำเกินไปคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับจากอนุภาค

ติดตามการไหลจะมีความเข้มต่ำ ทำให้สัญญาณสะท้อนถูกบดบังด้วยสัญญาณรบกวนซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณความเร็วของของเหลว แต่หากแอมพลิจูดสูงเกินไปถึงแม้จะเพิ่มระดับสัญญาณสะท้อนได้แต่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้ เช่น การแตกหัก การเสื่อมสภาพ ความร้อนสูง ที่ส่งผลต่อความผิดพลาดของคลื่นเสียงได้ ดังนั้น แอมพลิจูดของพัลส์ถือเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อความเข้มของคลื่นเสียง ความสามารถในการเดินทางผ่านตัวกลางของคลื่นเสียง และคุณภาพของสัญญาณสะท้อนที่ได้รับกลับมา

2.8.4.3 ความถี่การส่งพัลส์ซ้ำ (Pulse Repetition Frequency)

เป็นจำนวนครั้งของการส่งสัญญาณพัลส์คลื่นเสียงความถี่สูงที่ออกจากทรานสดิวเซอร์ภายในหนึ่งวินาที สำหรับระบบ UVP เป็นพารามิเตอร์ที่จะกำหนดความถี่ของการส่งสัญญาณไปยังของเหลวเพื่อที่จะรับสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคติดตามและนำมาใช้คำนวณความเร็วของเหลวจากหลักการดอปเพลอร์ ความถี่การส่งพัลส์ซ้ำในแต่ละครั้งมีความสัมพันธ์กับเวลาทั้งหมดที่ใช้ตั้งแต่เริ่มส่งพัลส์หนึ่งจนถึงเริ่มต้นส่งพัลส์ถัดไป (Pulse Repetition Period) สามารถคำนวนได้ตามสมการที่(2-19)

$$f_{prf} = \frac{1}{T_{prp}} \qquad (2\text{-}19)$$

เมื่อ f_{prf} คือ ความถี่การส่งพัลส์ซ้ำ (Hz)

T_{prp} คือ ระยะเวลาหว่างการส่งพัลส์แต่ละครั้ง (s)

การเลือกความถี่การส่งพัลส์ซ้ำที่เหมาะสมมีความสำคัญมาก เนื่องจากต้องคำนึงถึงเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางไปยังตำแหน่งที่ไกลที่สุดภายในของไหลและสะท้อนกลับมายังทรานสดิวเซอร์ก่อนที่จะมีการส่งสัญญาณพัลส์ถัดไปตามเทคนิคการส่งพัลส์ซ้ำ หากกำหนดความถี่การส่งพัลส์ซ้ำสูงเกินไป สัญญาณสะท้อนจากพัลส์ก่อนหน้าอาจจะยังเดินทางกลับมาไม่ถึง แต่ระบบได้เริ่มส่งสัญญาณใหม่ไปแล้ว ซึ่งจะทำให้เกิดความคลุมเคลือของสัญญาณซึ่งส่งผลต่อความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งและการคำนวณความเร็วของเหลว หากกำหนดความถี่การส่งพัลส์ซ้ำต่ำเกินไป แม้ว่าจะสามารถวัดได้ในระยะที่มากขึ้นเนื่องจากเวลาในการเดินทางของคลื่นมากขึ้นก่อนที่จะส่งพัลส์ถัดไป แต่จำนวนสัญญาณสะท้อนที่ใช้ในการประมวลผลต่อหน่วยเวลาจะลดลง ส่งผลต่อความล่าเอียดเชิงเวลาของการวัดและอาจทำให้ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงการไหลที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้

2.8.4.4 จำนวนรอบของคลื่นในหนึ่งพัลส์ (Number of Cycles)

เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่กำหนดลักษณะของสัญญาณที่ส่งออกจากทรานสดิวเซอร์ สำหรับระบบ UVP เป็นจำนวนรอบของคลื่นเสียงที่มีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์ เมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ สร้างพัลล์คลื่นเสียง สัญญาณที่ส่งออกไปจะไม่ใช่ลักษณะที่เป็นคลื่นไซน์ต่อเนื่องแต่เป็นชุดของคลื่นไซน์ที่มีจำนวนจำกัด เช่น หากกำหนดจำนวนรอบของคลื่นในหนึ่งพัลส์เท่ากับสี่ ในหนึ่งสัญญาณพัลส์จะประกอบด้วยคลื่นไซน์จำนวนสี่รอบที่ส่งออกไปก่อนที่เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์

จะหยุดเพื่อรอรับสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคติดตาม ระยะเวลาของสัญญาณพัลส์ สามารถคำนวนได้ตามสมการที่ (2-20)

$$T_p = \frac{N_c}{f_0} \qquad (2\text{-}20)$$

เมื่อ T_p คือ ระยะเวลาของพัลส์ (s)

N_c คือ จำนวนรอบของคลื่นในหนึ่งพัลส์

f_0 คือ ความถี่ของคลื่นเสียงที่ปล่อยออกจากทรานสดิวเซอร์ (Hz)

การกำหนดจำนวนรอบของคลื่นในหนึ่งพัลส์มีผลต่อสัญญาณสะท้อน เมื่อจำนวนรอบของคลื่นในหนึ่งพัลส์มากขึ้น พลังงานของคลื่นเสียงที่ส่งออกไปจะมากขึ้นตาม ทำให้สัญญาณสะท้อนที่ได้รับจากอนุภาคติดตามมีพลังงานหรือแอมพลิจูดที่มากขึ้น แต่จะทำให้ระยะเวลาการส่งสัญญาญพัลส์แต่ละครั้งเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งส่งผลต่อความละเอียดเชิงพื้นที่เนื่องจากทำให้ไม่สามารถแยกระยะเวลาของสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคที่อยู่ใกล้กันให้ออกจากกันได้ ทำให้ตำแหน่งและช่วงของการวัดขยายใหญ่ขึ้นตามความยาวของพัลส์

2.8.4.5 จำนวนครั้งของการทำซ้ำ (Number of Repetition)

เป็นจำนวนครั้งที่ทำการส่งสัญญาณพัลส์คลื่นเสียงและรับสัญญาณสะท้อนแบบซ้ำ ๆ ตามเทคนิคการส่งพัลส์ซ้ำภายใต้เงื่อนไขการวัดเดียวกัน เพื่อรวบรวมข้อมูลหลาย ๆ ชุด จากข้อมูลที่ได้นั้นจะถูกนำมาประมวลผลด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) หรือวิธีการออโตคอรีเลชัน (Autocorrelation) เพื่อประมาณค่าความถี่ดอปเพลอร์ที่จะใช้ในการคำนวณความเร็วของอนุภาคติดตามหรือของเหลวจากการเปลี่ยนเฟสของสัญญาณสะท้อน จำนวนครั้งของการทำซ้ำจะเป็นตัวกำหนดชุดข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ยความถี่ดอปเพลอร์ เมื่อทำการส่งพัลส์ซ้ำเป็นจำนวนมากจะสามารถลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและเพิ่มความถูกต้องในการประมาณความถี่ดอปเพลอร์จากการใช้วิธีการทางสถิติในการหาค่าเฉลี่ย การกำหนดจำนวนครั้งของการทำซ้ำต้องให้มีความเหมาะสม หากกำหนดจำนวนครั้งของการทำซ้ำน้อยเกินไปจำนวนข้อมูลที่ใช้ไม่เพียงพอ ส่งผลให้การคำนวณความถี่ดอปเพลอร์มีความไม่แน่นอน หากกำหนดจำนวนครั้งการทำซ้ำมากเกินไปถึงแม้ว่าจะช่วยลดความแปรปรวนแต่จะทำให้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลมากขึ้นทำให้ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของการไหลที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ ยกตัวอย่างการใช้งานในระบบ UVP เช่น หากกำหนดจำนวนครั้งของการทำซ้ำ 128 ครั้ง เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์จะส่งพัลส์จำนวน 128 ครั้งด้วยความถี่การส่งพัลส์ซ้ำแบบคงที่ จากนั้นเครื่องรับสัญญาณจะรับสัญญาณสะท้อนจากตำแหน่งเดียวกันทั้ง 128 สัญญาณมาประมวลผลเพื่อหาค่าความเร็วของอนุภาคติดตามในตำแหน่งนั้น กระบวนการจะดำเนินการซ้ำสำหรับทุกตำแหน่งตลอดช่วงการวัดจนได้โพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วตลอดแนวลำคลื่น

2.8.4.6 ความกว้างของช่องสัญญาณ (Channel Width)

เป็นช่วงระยะทางที่กำหนดให้บริเวณตามระยะทางนั้นเป็นหนึ่งตำแหน่งสำหรับการเก็บข้อมูลของสัญญาณสะท้อนตามแนวการแพร่กระจายของคลื่นเสียง หรืออาจมองได้ว่าเป็นช่องสัญญาณที่สอดคล้องกับระยะทางหนึ่งช่วงภายในของไหล ในการทำงานจริงของระบบ UVP จะปล่อยคลื่นเสียงเข้าสู่ของเหลวและรับสัญญาณสะท้อนของกลุ่มอนุภาคติดตาม จากนั้นตัวประมวลผลจะกำหนดช่วงเวลาการรับสัญญาณให้สอดคล้องกับตำแหน่งต่างๆ ตามแนวลำคลื่น โดยแต่ละช่วงจะถูกแบ่งออกเป็นช่องสัญญาณซึ่งมีความกว้างคงที่เท่ากันตลอดช่วงการวัด ดังนั้น สัญญาณสะท้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลาดังกล่าวหรือช่องสัญญาณเดียวกันจะถูกนำมารวมและประมวลผลเป็นความเร็วเพียงค่าเดียวของช่องสัญญาณนั้น ความกว้างของช่องสัญญาณส่งผลโดยตรงต่อความละเอียดในการวัด หากความกว้างของช่องสัญญาณมีขนาดเล็กจะสามารถแยกตำแหน่งของอนุภาคที่อยู่ใกล้กันได้ละเอียดมากขึ้นทำให้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้ดี แต่การลดขนาดที่มากเกินไปจะทำให้พลังงานของสัญญาณสะท้อนที่อยู่ภายในแต่ละช่องลดลง อาจส่งผลให้ความแม่นยำลดลง หากความกว้างของช่องสัญญาณมีขนาดมากขึ้น สัญญาณสะท้อนจากอนุภาคติดตามจำนวนมากภายในช่องสัญญาณเดียวกันจะถูกรวมเข้าด้วยกัน ทำให้พลังงานสัญญาณสะท้อนเพิ่มขึ้น แต่จะแลกมาด้วยความละเอียดเชิงพื้นที่ที่ลดลง เนื่องจากความเร็วที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของอนุภาคติดตามทั้งหมดภายในช่วงระยะนั้น

2.8.4.7 อัตราขยายพื้นฐาน (Base Gain)

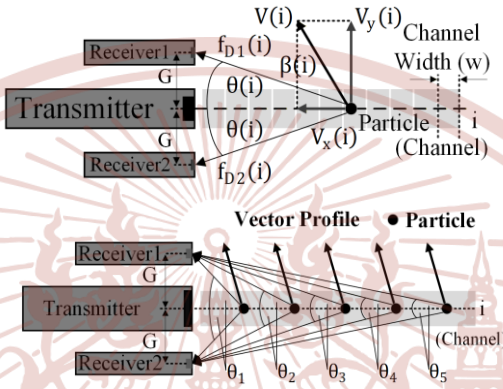
เป็นค่าการขยายสัญญาณเริ่มต้นที่ถูกกำหนดให้กับเครื่องรับสัญญาณก่อนที่สัญญาณสะท้อนจะถูกนำไปประมวลผล โดยมีหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณสะท้อนที่ได้รับจากทรานสดิวเซอร์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล สำหรับระบบ UVP สัญญาณสะท้อนกลับจากอนุภาคติดตามการไหลจะมีแอมพลิจูดแตกต่างกันตามระยะทาง เนื่องจากคลื่นเสียงเกิดการลดทอนระหว่างการเดินทาง ทำให้สัญญาณสะท้อนจากบริเวณที่อยู่ลึกมีขนาดเล็กหรือแอมพลิจูดต่ำกว่าสัญญาณจากบริเวณใกล้ทรานสดิวเซอร์ ดังนั้น อัตราขยายพื้นฐานจึงถูกใช้เพื่อกำหนดระดับการขยายพื้นฐานของสัญญาณทั้งหมดให้มีขนาดที่เพียงพอสำหรับนำไปประมวลผล

2.8.4.8 อัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate)

เป็นจำนวนครั้งที่ทำการสุ่มหรือบันทึกค่าของสัญญาณแอนะล็อกภายในช่วงเวลา 1 วินาที เพื่อแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลสำหรับการประมวลผล สำหรับระบบ UVP อัตราการสุ่มตัวอย่างเป็นพารามิเตอร์สำคัญของวงจรแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัลซึ่งทำหน้าที่สุ่มค่าของสัญญาณสะท้อน การเลือกอัตราการสุ่มตัวอย่างมีผลโดยตรงต่อความละเอียดเชิงเวลาของสัญญาณสะท้อนตามทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างของไนควิสต์ ซึ่งระบุว่าอัตราการสุ่มตัวอย่างจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2 เท่า ของความถี่สูงสุดที่มีอยู่ในสัญญาณ เพื่อป้องกันการเกิด Aliasing ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความถี่

ของสัญญาณถูกบิดเบือนจนไม่สามารถกู้คืนข้อมูลเดิมได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น การกำหนดอัตราการสุ่มตัวอย่างให้เพียงพอจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่ช่วยให้การคำนวณความเร็วของอนุภาคติดตามการไหลมีความถูกต้อง

2.8.5 หลักการพื้นฐาน UVP แบบ Multi-Element



ภาพที่ 2-4 หลักการพื้นฐานเทคนิค UVP แบบ Multi-Element

เป็นเทคนิคการวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วของของเหลวที่ใช้หลักการพื้นฐานเดียวกันกับ UVP แบบ Single-Element โดยอาศัยหลักการของคลื่นเสียงความถี่สูง ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ และเทคนิคการส่งพัลส์ซ้ำ เพื่อวัดเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคติดตามการไหลที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับของเหลว แต่เทคนิค UVP แบบ Multi-Element จะใช้ทรานสดิวเซอร์มากกว่าหนึ่งตัวซึ่งขึ้นอยู่กับระบบที่ออกแบบใช้งาน วิทยานิพนธ์เรื่องนี้นำเสนอการใช้งานทรานสดิวเซอร์จำนวนสามตัว โดยหนึ่งตัวสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงและอีกสองตัวใช้สำหรับรับสัญญาณสะท้อนคลื่นเสียงจากทิศทางที่แตกต่างกันสองทิศทาง เมื่อทรานสดิวเซอร์ปล่อยคลื่นเสียงผ่านเข้าไปภายในของเหลวกระทบกับอนุภาคติดตามและเกิดสัญญาณสะท้อน ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้สำหรับรับสัญญาณสะท้อนจะสามารถวัดสัญญาณสะท้อนจากการสะท้อนของอนุภาคติดตามได้ในแต่ละช่วงการวัดที่ตำแหน่ง (i) และทำมุมสะท้อนกับแนวลำคลื่น $\theta(\mathrm{i})$ ทำให้ได้ความถี่ดอปเพลอร์ $\mathrm{f_{D1}(i)}$ และ $\mathrm{f_{D2}(i)}$ ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคติดตามและนำไปใช้ในการคำนวณความเร็วตามแนวแกนการสะท้อน $\mathrm{V_1(i)}$ และ $\mathrm{V_2(i)}$ เมื่อทราบตำแหน่งและมุมของตัวรับทั้งสองจะใช้หลักการแยกองค์ประกอบของเวกเตอร์เพื่อคำนวณหาความเร็วจริงของอนุภาคติดตาม คือ ความเร็วตามแนวลำคลื่นเสียง $\mathrm{V_x(i)}$ และความเร็วตามแนวตั้งฉากลำคลื่นเสียง $\mathrm{V_y(i)}$ ที่สามารถรวมองค์ประกอบของเวกเตอร์ให้เป็นเวกเตอร์ความเร็ว $\mathrm{V(i)}$ ได้ เทคนิค UVP แบบ Multi-Element เป็นวิธีการวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วแบบสองมิติ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิค UVP แบบ Single-Element ที่สามารถวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วได้เฉพาะตามแนวลำคลื่นเสียงเท่านั้น ความถี่ดอปเพลอร์ที่เกิดขึ้นจะ

สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2-16) และสามารถคำนวณความเร็วของอนุภาคติดตามได้ตามสมการต่อไปนี้

$$V_1(i) = \frac{cf_{D1}(i)}{2f_0} \quad (2\text{-}21)$$

$$V_2(i) = \frac{cf_{D2}(i)}{2f_0} \quad (2\text{-}22)$$

$$V_x(i) = \frac{V_1(i) - V_2(i)}{\sin\theta(i)} \quad (2\text{-}23)$$

$$V_y(i) = \frac{V_1(i) + V_2(i)}{1 + \cos\theta(i)} \quad (2\text{-}24)$$

$$V(i) = \sqrt{V_x^2(i) + V_y^2(i)} \quad (2\text{-}25)$$

เมื่อ $V_1(i)$ คือ ความเร็วตามแนวแกนการสะท้อนของตัวรับสัญญาณที่หนึ่ง

$V_2(i)$ คือ ความเร็วตามแนวแกนการสะท้อนของตัวรับสัญญาณที่สอง

$V_x(i)$ คือ องค์ประกอบความเร็วตามแนวลำคลื่นเสียงของอนุภาคติดตาม

$V_y(i)$ คือ องค์ประกอบความเร็วตามแนวตั้งฉากลำคลื่นเสียงของอนุภาคติดตาม

$V(i)$ คือ ความเร็วของอนุภาคติดตาม

$\theta(i)$ คือ มุมสะท้อนกับแนวลำคลื่น

$f_{D1}(i)$ คือ ความถี่ดอปเพลอร์ของตัวรับสัญญาณที่หนึ่ง

$f_{D2}(i)$ คือ ความถี่ดอปเพลอร์ของตัวรับสัญญาณที่สอง

2.8.6 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing)

2.8.6.1 แบบจำลองสัญญาณสะท้อนดอปเพลอร์ (Doppler Echo Signal Model)

เป็นแบบจำลองของสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคติดตามการไหลที่ตำแหน่งหนึ่งภายในของไหล เมื่อมีการส่งพัลส์คลื่นเสียงด้วยความถี่การส่งพัลส์ซ้ำ การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของสัญญาณสะท้อนระหว่างพัลส์ที่ต่อเนื่องกันที่มีความสัมพันธ์กับความถี่ดอปเพลอร์ การเปลี่ยนเฟสนั้นเป็นข้อมูลที่ใช้ในการประมาณความเร็วของอนุภาคติดตามและสร้างโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วของของเหลว แบบจำลองใช้สำหรับอธิบายการเกิดสัญญาณดอปเพลอร์ก่อนเข้าสู่กระบวนการประมาณความเร็วสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2-26)

$$e(t) = A_n \cos\left[2\pi\left(f_0(t - t_n) + n\frac{f_D}{f_{prf}}\right)\right] \quad (2\text{-}26)$$

เมื่อ $e(t)$ คือ สัญญาณสะท้อนที่ได้รับ

A_n คือ แอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนของพัลส์ที่ n

f_0 คือ ความถี่ของคลื่นเสียงที่ปล่อยออกจากทรานสดิวเซอร์ (Hz)

t_n คือ เวลาหน่วงของพัลส์ลำดับที่ n (s)

f_D คือ ความถี่ดอปเพลอร์ (Hz)

f_{prf} คือ ความถี่การส่งพัลส์ซ้ำ (Hz)

2.8.6.2 การดีมอดูเลตแบบควอดราเจอร์ (Quadrature Demodulation)

เป็นเทคนิคการประมวลผลสัญญาณที่ใช้สำหรับแยกสัญญาณที่มีความถี่สูงออกเป็นองค์ประกอบสัญญาณสองส่วนที่ตั้งฉากกัน คือ สัญญาณเฟสตรง (In Phase) และ สัญญาณเฟสตั้งฉาก (Quadrature) เพื่อแปลงสัญญาณความถี่พาหะให้อยู่ในรูปของสัญญาณย่านความถี่ฐาน สำหรับระบบ UVP ทรานสดิวเซอร์จะส่งคลื่นเสียงที่ความถี่ f_0 เข้าไปในของไหล อนุภาคติดตามการไหลจะสะท้อนคลื่นเสียงกลับมายังตัวรับ ความถี่ของสัญญาณสะท้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2-27)

$$f_r = f_0 + f_D \quad (2\text{-}27)$$

เมื่อ f_r คือ ความถี่ของสัญญาณสะท้อน (Hz)

f_0 คือ ความถี่ของคลื่นเสียงที่ปล่อยออกจากทรานสดิวเซอร์ (Hz)

f_D คือ ความถี่ดอปเพลอร์ (Hz)

เนื่องจาก f_D มีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ f_0 การวิเคราะห์สัญญาณสะท้อนโดยตรงทำได้ยาก จึงใช้การดีมอดูเลตแบบควอดราเจอร์เพื่อแปลงความถี่และแยกสัญญาณความถี่ดอปเพลอร์ออกโดยยังคงข้อมูลเฟสและแอมพลิจูดไว้ โดยจะนำสัญญาณสะท้อนมาคูณกับสัญญาณอ้างอิงสองชุด คือ สัญญาณอ้างอิงแบบโคไซน์ (Cosine Reference) และ สัญญาณอ้างอิงแบบไซน์ (Sine Reference) จากนั้นจึงผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter) เพื่อตัดองค์ประกอบความถี่สูงออก เหลือเพียงความถี่ดอปเพลอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2-28) และ (2-29) และเมื่อได้สัญญาณ $I(n)$ และ $Q(n)$ จะสามารถเขียนสมการสัญญาณสะท้อนเชิงซ้อนได้ตามสมการที่ (2-30)

$$I[n] = A_n \cos\left(\frac{2\pi n f_D}{f_{prf}}\right) \quad (2\text{-}28)$$

$$Q[n] = iA_n \sin\left(\frac{2\pi n f_D}{f_{prf}}\right) \quad (2\text{-}29)$$

$$D[n] = A_n \cos\left(\frac{2\pi n f_D}{f_{prf}}\right) - iA_n \sin\left(\frac{2\pi n f_D}{f_{prf}}\right) \quad (2\text{-}30)$$

เมื่อ $D[n]$ คือ สัญญาณดอปเพลอร์เชิงซ้อนของพัลส์ลำดับที่ n

A_n คือ แอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนในพัลส์ที่ n

n คือ ลำดับของพัลส์

f_D คือ ความถี่ดอปเพลอร์ (Hz)

f_{prf} คือ ความถี่การส่งพัลส์ซ้ำ (Hz)

หลังจากผ่านกระบวนการนี้จะได้สัญญาณดอปเพลอร์เชิงซ้อนสำหรับทุกตำแหน่งการวัด จากนั้นข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเฟสของสัญญาณสะท้อนระหว่างพัลส์ที่ต่อเนื่องกัน

2.8.6.3 ออโตคอรีเลชัน (Autocorrelation)

เป็นวิธีการประมวลผลสัญญาณที่ใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกับตัวเองเมื่อมีการเลื่อนเวลา เพื่อค้นหาความคล้ายคลึงของสัญญาณในช่วงเวลาที่ต่างกัน หากสัญญาณมีลักษณะเป็นคาบหรือมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสอย่างต่อเนื่องค่าการคำนวณจะมีค่ามาก แต่หากสัญญาณเป็นแบบสุ่มหรือมีสัญญาณรบกวนเป็นหลักค่าการคำนวณจะมีค่าต่ำลง สำหรับระบบ UVP เมื่อทรานสดิวเซอร์ส่งพัลส์คลื่นเสียงความถี่สูงเข้าสู่ของไหล อนุภาคติดตามการไหลจะสะท้อนคลื่นกลับมายังตัวรับ หากอนุภาคติดตามเกิดการเคลื่อนที่ความถี่ของสัญญาณสะท้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามหลักการดอปเพลอร์ ส่งผลให้เฟสของสัญญาณสะท้อนในแต่ละพัลส์เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะใช้ออโตคอรีเลชันคำนวณหาความแตกต่างของเฟสจากความสัมพันธ์ของสัญญาณเชิงซ้อนระหว่างพัลส์ที่อยู่ติดกันเพื่อประมาณความถี่ดอปเพลอต่อไป สามารถแสดงสมการคำนวณออโตคอรีเลชันและความถี่ดอปเพลอร์ได้ตามสมการที่ (2-31), (2-32), (2-33) และ (2-34)

$$R_m = \sum_{n=0}^{N_{rep}-2} D[n] \times \overline{D}[n+1] \quad (2\text{-}31)$$

$$R_m = R_A + iR_B \quad (2\text{-}32)$$

$$\Delta\emptyset = \tan^{-1}\frac{R_B}{R_A} \quad (2\text{-}33)$$

$$f_D = \frac{\Delta\emptyset}{2\pi T_{prf}} \quad (2\text{-}34)$$

เมื่อ R_m คือ ค่าผลรวมของการคูณเชิงซ้อน

$D[n]$ คือ สัญญาณดอปเพลอร์เชิงซ้อนของพัลส์ลำดับที่ n

$\overline{D}[n+1]$ คือ ค่าคอมเพล็กซ์คอนจูเกตของสัญญาณของสัญญาณพัลส์ถัดไป

2.9 คุณภาพสัญญาณ (Signal Quality)

คุณภาพสัญญาณเป็นปัจจัยพื้นฐานที่กำหนดความแม่นยำของระบบ UVP ในด้านการวัดสัญญาณสะท้อน การประมาณการเปลี่ยนแปลงเฟส และการคำนวณความถี่ดอปเพลอร์ หากสัญญาณมีคุณภาพสูง ระบบจะสามารถประมาณความเร็วของการไหลได้อย่างถูกต้อง และให้ผลการวัดที่มีความเสถียร แต่หากคุณภาพสัญญาณต่ำ ความคลาดเคลื่อนในการประมาณเฟสจะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความเร็วเกิดความผันผวน และอาจทำให้ระบบไม่สามารถวัดได้

2.9.1 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio)

เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินคุรภาพของสัญญาณที่ได้รับ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในระบบ ยิ่งค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงแสดงว่าสัญญาณที่ต้องการมีความเด่นชัดเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนส่งผลให้สามารถวิเคราะห์หรือประมวลผลข้อมูลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น หากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำสัญญาณรบกวนจะมีอิทธิพลต่อข้อมูลที่ได้รับมากขึ้นทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดและลดความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์ สำหรับระบบ UVP อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเป็นตัวแปรสำคัญที่สะท้อนคุณภาพของสัญญาณสะท้อน เนื่องจากการคำนวณความเร็วของการไหลอาศัยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสหรือความถี่ดอปเพลอร์ของสัญญาณสะท้อน หากสัญญาณสะท้อนมีระดับต่ำเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวน จะทำให้ไม่สามารถระบุความถี่ดอปเพลอร์ได้อย่างถูกต้อง ส่งผลให้ค่าความเร็วที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อน อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมักแสดงในหน่วยเดซิเบล (Decibel) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2-35)

$$\mathrm{SNR} = 20\log_{10}\left(\frac{\mathrm{A_{signal}}}{\mathrm{A_{noise}}}\right) \qquad (2\text{-}35)$$

เมื่อ SNR คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

$\mathrm{A_{signal}}$ คือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่ต้องการ

$\mathrm{A_{noise}}$ คือ แอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน

2.9.2 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

เป็นตัวชี้วัดทางสถิติที่ใช้แสดงระดับการกระจายตัวของข้อมูลเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ย (Mean) โดยเป็นค่าที่บ่งบอกว่าข้อมูลแต่ล่ะค่ามีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยมากน้อยเพียงใด หากค่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยแสดงว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอยู่ใกล้กับค่าเฉลี่ยและมีความสม่ำเสมอสูง แต่หากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่ามากแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวกว้างและมีความแปรปรวนสูง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญสำหรับประเมินความน่าเชื่อถือ ความเที่ยงตรง และความสามารถในการทำซ้ำของผลการทดลอง เนื่องจากสามารถแสดงให้เห็นถึงความแปรผันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการวัดของเครื่องมือวัด สำหรับระบบ UVP ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถูก

นำมาใช้ประเมินความสม่ำเสมอและความน่าเชื่อถือของข้อมูลความเร็วที่วัดได้จากการส่งพัลส์หลาย ๆ ครั้งที่ตำแหน่งเดียวกันเพื่อประเมินความผันผวนของค่าความเร็วหรือความสามารถในการทำซ้ำในการวัด ซึ่งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ใช้กับข้อมูลตัวอย่างสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2-36)

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \qquad (2\text{-}36)$$

เมื่อ s คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลตัวอย่าง

n คือ จำนวนข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด

x_i คือ ข้อมูลตัวอย่างแต่ละลำดับ

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตัวอย่าง

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวของ

2.10.1 Particle image velocimetry for characterizing the flow structure in three-dimensional gas liquid-solid fluidized beds [2]

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบการวัดด้วยเทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV) สำหรับศึกษาพฤติกรรมการไหลเฉพาะที่ในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบสามเฟส คือ ก๊าซ ของเหลวและของแข็ง โดยใช้การจัดแนวค่าดัชนีหักเหระหว่างของแข็งและของเหลวเพื่อลดการรบกวนทางแสง ทำให้สามารถวัดสนามความเร็ว การกระจายตัวของเฟส ความผันผวน ความเร่ง ขนาดฟองและคุณลักษณะทางสถิติของการไหลได้ ระบบ PIV ประกอบด้วยการสร้างแผ่นแสงเลเซอร์ การบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD และการประมวลผลภาพเพื่อคำนวณเวกเตอร์ความเร็วและพารามิเตอร์ของการไหล โดยมีการปรับปรุงซอฟต์แวร์ให้สามารถแยกเฟส ระบุตำแหน่งอนุภาค คำนวณความเร็ว ความเร่ง โฮลด์อัป และความเข้มของการหมุนวนได้ การจัดแนวค่าดัชนีหักเหช่วยให้สามารถวัดในสภาวะที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสูงได้ดีขึ้น ผลการทดสอบยืนยันว่าระบบมีความคลาดเคลื่อนในการวัดความเร็วของอนุภาคไม่เกินประมาณ ±1% แม้ว่าการวัดขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะได้รับผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของแสงและความละเอียดของกล้อง นอกจากนี้ยังสามารถวัดความเร็วและความเร่งของฟองก๊าซ รวมถึงตรวจพบรูปแบบการไหลหมุนเวียนของของเหลวและอนุภาคในบริเวณเหนือชั้นฟลูอิไดซ์เบดได้ อีกทั้งยังสามารถประเมินความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของแข็งและของเหลวได้ แม้ว่าการติดตามการเคลื่อนที่ของของเหลวบริเวณใกล้ฟองก๊าซจะยังมีข้อจำกัดจากความเข้มของภาพอนุภาคงานวิจัยจึงเสนอให้ใช้อนุภาคติดตามที่มีการสะท้อนแสงสูงขึ้นเพื่อเพิ่มคุณภาพของภาพและความแม่นยำในการวัดในบริเวณดังกล่าว

2.10.2 Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method [3]

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เครื่องตรวจวัดการไหลของเลือดด้วยหลักการอัลตราซาวด์ดอปเพลอร์เพื่อวัดโพรไฟล์ความเร็วของการไหลในของไหลทั่วไป โดยทำการทดลองกับการไหลแบบปั่วซอยล์ในท่อและการไหลแบบเทย์เลอร์วอร์เทกซ์ในระบบกระบอกสูบหมุน ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าโพรไฟล์ความเร็วที่ได้สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี หลักการวัดอาศัยการส่งพัลส์อัลตราซาวด์ รับสัญญาณสะท้อน และคำนวณความเร็วจากการเลื่อนความถี่ดอปเพลอร์พร้อมระบุตำแหน่งจากเวลาการเดินทางของคลื่น สัญญาณที่ได้รับถูกขยาย ดีมอดูเลต แปลงเป็นดิจิทัล และกรองสัญญาณรบกวนก่อนนำมาสร้างฮิสโตแกรมของความเร็วในแต่ละตำแหน่ง ระบบสามารถวัดได้สูงสุดประมาณ 128 ช่องสัญญาณ ให้ระยะวัดประมาณ 9.2 เซนติเมตร และความละเอียดเชิงตำแหน่งประมาณ 0.7 มิลลิเมตร การทดลองใช้ผงอะลูมินาขนาดประมาณ 5 ไมโครเมตรเป็นอนุภาคสะท้อนคลื่นเพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณดอปเพลอร์ได้ สำหรับการไหลแบบเทย์เลอร์วอร์เทกซ์พบว่าการเฉลี่ยข้อมูลประมาณ 25–50 เฟรมช่วยลดความผันผวนของผลการวัดได้ แม้ว่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองจะได้รับอิทธิพลจากปริมาณอนุภาคสะท้อน การเฉลี่ยเชิงเวลา และข้อจำกัดของอุปกรณ์ แต่ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นว่าวิธีนี้สามารถวัดโพรไฟล์ความเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับของไหลทึบแสง เช่น โลหะหลอมเหลว ซึ่งวิธีการวัดเชิงแสงไม่สามารถใช้งานได้

2.10.3 Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound Doppler velocimetry [4]

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค Ultrasound Doppler Velocimetry (UDV) สำหรับตรวจวัดโพรไฟล์ความเร็วของการไหลของโซเดียมเหลวภายในท่อสี่เหลี่ยมภายใต้สนามแม่เหล็กตามขวาง โดยอาศัยหลักการวัดการเลื่อนความถี่ดอปเพลอร์ของคลื่นอัลตราซาวด์ที่สะท้อนจากอนุภาคภายในของไหลเพื่อคำนวณความเร็วตามแนวลำคลื่น งานวิจัยได้แก้ไขปัญหาด้านการส่งคลื่นอัลตราซาวด์ผ่านผนังสเตนเลส การเชื่อมต่อทางเสียงระหว่างทรานสดิวเซอร์กับผนังท่อ และการทำให้ผิวสัมผัสกับโซเดียมเหลวมีการเปียกตัวที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านคลื่นนอกจากนี้ยังใช้สิ่งเจือปนตามธรรมชาติในโซเดียมเป็นตัวสะท้อนสัญญาณแทนการเติมอนุภาคติดตามการไหล การทดลองดำเนินการด้วยทรานสดิวเซอร์ความถี่ 4 MHz ที่อุณหภูมิประมาณ 145 ถึง 200 องศา และคำนวณค่าเฉลี่ยจากข้อมูลหลายชุดเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวัด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีสนามแม่เหล็ก โปรไฟล์ความเร็วของของไหลเปลี่ยนเป็นลักษณะรูปตัว M ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของการไหลแบบแมกนีโตไฮโดรไดนามิก (MHD) แม้ว่าจะมีข้อจำกัดจากการสั่นค้างของทรานสดิวเซอร์และการสะท้อนหลายครั้งภายในผนังท่อที่ส่งผลต่อความแม่นยำในบางตำแหน่ง แต่ผลการวัดยังสอดคล้องกับทฤษฎีและผลการทดลองที่ผ่านมา งานวิจัยจึงยืนยันว่า UDV สามารถใช้

ตรวจวัดโปรไฟล์ความเร็วของโซเดียมเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมเสนอว่าการเลือกวัสดุที่มีอิมพีแดนซ์เสียงใกล้เคียงกับโซเดียมและการพัฒนาวิธีลดข้อจำกัดด้านอุณหภูมิของทรานสดิวเซอร์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในอนาคต

2.10.4 Measurement of LBE flow velocity profile by UDVP [5]

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค Ultrasonic Doppler Velocity Profiler (UDVP) สำหรับการตรวจวัดการไหลของโลหะผสมตะกั่ว–บิสมัท (Lead–Bismuth Eutectic: LBE) ซึ่งเป็นสารหล่อเย็นที่มีศักยภาพในระบบนิวเคลียร์ แต่มีปัญหาการกัดกร่อนและการสึกกร่อนของวัสดุจากการไหล รวมถึงการถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อนย้ายมวลของสารละลายภายในระบบ งานวิจัยดำเนินการทดลองในระบบ JAEA Lead Bismuth Loop-2 (JLBL-2) โดยใช้โพรบ UDVP ความถี่ 4 MHz เพื่อตรวจวัดโพรไฟล์ความเร็วของ LBE ที่อุณหภูมิประมาณ 140 ถึง 150 องศา และศึกษาผลของสภาพผิวสัมผัสต่อการรับสัญญาณอัลตราซาวด์ ผลการทดลองพบว่าภาชนะสเตนเลสที่ไม่มีการปรับสภาพผิวไม่สามารถรับสัญญาณสะท้อนได้อย่างเพียงพอ ขณะที่การเคลือบผิวด้านในด้วยตะกั่วดีบุกเพิ่มความเข้มของสัญญาณสะท้อนและทำให้สามารถวัดความเร็วของการไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวัดโพรไฟล์ความเร็วแสดงให้เห็นว่าความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่บริเวณความลึกประมาณ 20–25 มิลลิเมตร ก่อนจะลดลงและเกิดความผันผวนตามแนวการไหล นอกจากนี้ยังมีการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Star-CD โดยใช้แบบจำลอง k–**ε** turbulence ซึ่งสามารถทำนายแนวโน้มการเร่งความเร็วของของไหลได้สอดคล้องกับผลการทดลอง แม้ว่าค่าความเร็วสูงสุดจากการจำลองจะต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง การศึกษายังพบว่าหลังการแช่ตะกั่วดีบุกใน LBE ชั้นเคลือบเดิมถูกแทนที่ด้วยตะกั่วและบิสมัท แต่ยังคงมีคุณสมบัติช่วยให้คลื่นอัลตราซาวด์ส่งผ่านได้ดี และคาดว่าฟองก๊าซขนาดเล็กหรือสิ่งเจือปนภายใน LBE ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นอัลตราซาวด์ โดยสรุป งานวิจัยยืนยันว่า UDVP สามารถใช้ตรวจวัดโพรไฟล์ความเร็วของ LBE ได้สำเร็จ หากมีการเตรียมสภาพผิวของภาชนะอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะการเคลือบผิวด้วยตะกั่วดีบุกซึ่งช่วยเพิ่มการส่งผ่านสัญญาณและทำให้สามารถวัดการไหลของ LBE ได้อย่างน่าเชื่อถือ

2.10.5 Velocity profile measurement of the Taylor vortex flow of a magnetic fluid using the ultrasonic Doppler method [6]

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค Ultrasound Velocity Profile (UVP) เพื่อวัดสนามความเร็วของการไหลแบบเทย์เลอร์วอร์เทกซ์ในของไหลแม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ โดยใช้การวัดการเลื่อนความถี่ดอปเพลอร์ของคลื่นอัลตราซาวด์ที่สะท้อนจากอนุภาคติดตามในการคำนวณโปรไฟล์ความเร็ว เนื่องจากอนุภาคแม่เหล็กภายในของไหลมีขนาดเล็กเกินกว่าจะให้สัญญาณสะท้อนที่เพียงพอ จึงเติมอนุภาคซิลิกาทรงกลวงเพื่อเป็นตัวสะท้อนสัญญาณและติดตามการไหล การทดลองดำเนินการในระบบโครงสร้างทรงกระบอกที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยวัดความเร็วตาม

แนวแกนและศึกษาความเร็วเสียงของของไหลที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของแมกนีไทต์ต่างกัน ผลการทดลองพบว่าความเร็วเสียงลดลงเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของแมกนีไทต์เพิ่มขึ้น ขณะที่สนามแม่เหล็กไม่ทำให้ความเร็วเสียงเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลโดยตรง เมื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ความเร็วของการไหล ความยาวคลื่นของเทย์เลอร์วอร์เทกซ์ และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมพลังงานสูงสุดลดลง อีกทั้งค่าตัวเลขเรย์โนลด์สำหรับการเกิดความไม่เสถียรเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ การไหลยังแสดงการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งเชิงมุมภายใต้สนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ โดยความเร็วสูงสุดขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวรัศมีและอิทธิพลของการไหลจากบริเวณต้นน้ำ แสดงให้เห็นว่าเทคนิค UVP สามารถใช้ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กต่อโครงสร้างการไหลของของไหลแม่เหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.10.6 Study on Ultrasonic Measurement for Determination of Leakage from Reactor Vessel and Debris Inspection [7]

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อระบุตำแหน่งการรั่วไหลและตรวจสอบเศษเชื้อเพลิงภายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่เสียหาย โดยใช้เทคนิค Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) ร่วมกับเซนเซอร์แบบอาเรย์ (Phased Array Sensor) และเทคนิคการสังเคราะห์รูรับแสง (Aperture Synthesis) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัด การตรวจหาตำแหน่งการรั่วไหลเริ่มจากการสร้างแผนที่การไหลของของเหลวในบริเวณกว้างด้วยเซนเซอร์แบบอาร์เรย์รูปพัด (Sectorial Array) และสร้างเวกเตอร์ความเร็วสองมิติจากองค์ประกอบความเร็วที่วัดได้ในหลายทิศทาง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถระบุบริเวณที่มีการไหลลงผิดปกติซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งการรั่วไหลได้ แม้ว่าจะไม่สามารถประเมินขนาดหรืออัตราการรั่วไหลได้โดยตรง หลังจากระบุตำแหน่งรั่วไหลเบื้องต้นแล้ว งานวิจัยใช้เซนเซอร์แบบอาเรย์เพื่อสร้างแผนที่การไหลความละเอียดสูงในบริเวณใกล้จุดรั่วไหล โดยอาศัยการควบคุมเวลาหน่วงของแต่ละองค์ประกอบเพื่อบังคับทิศทางลำคลื่นอัลตราโซนิก วิธีนี้ให้จำนวนจุดตรวจวัดมากกว่าแบบอาร์เรย์รูปพัดอย่างมาก ทำให้ได้รายละเอียดของสนามการไหลสูงขึ้น แต่มีระยะตรวจวัดที่สั้นกว่า งานวิจัยยังพัฒนา Ultrasonic Linear Array Sensor สำหรับการตรวจสอบรูปร่างของวัตถุ โดยใช้เทคนิคการสังเคราะห์รูรับแสงซึ่งรวมสัญญาณสะท้อนจากหลายองค์ประกอบของอาเรย์เพื่อสร้างภาพรูปร่างที่ชัดเจนขึ้น ผลการวัดการกระจายความดันเสียงแสดงให้เห็นว่าบริเวณระยะใกล้หัววัดของเซนเซอร์ (Near Field) มีระยะประมาณ 10 มิลลิเมตร และหลังจากนั้นลำคลื่นจะเริ่มกระจายตัวพร้อมกับความดันเสียงที่ลดลง การเปรียบเทียบกับการตรวจวัดแบบองค์ประกอบเดี่ยวพบว่าการสังเคราะห์รูรับแสงสามารถสร้างภาพพื้นผิวที่ขรุขระได้ต่อเนื่องและชัดเจนกว่า เนื่องจากสามารถรวมสัญญาณสะท้อนที่ได้รับจากหลายองค์ประกอบเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ เทคนิคการสังเคราะห์รูรับแสงสามารถทำงานร่วมกับ UVP ได้โดยไม่รบกวนกัน ทำให้สามารถตรวจสอบทั้งการไหลของของเหลวและรูปร่างของเศษเชื้อเพลิงภายใน

ระบบเดียวกัน โดยสรุปงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการผสานการทำงานของเซนเซอร์อาร์เรย์รูปพัด เซนเซอร์แบบอาเรย์ และการสังเคราะห์รูรับแสง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งการรั่วไหล และการตรวจสอบเศษเชื้อเพลิงภายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่เสียหายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.10.7 Development of a Remote Water Leakage Localization System Combined with Phased Array UVP and Robot [8]

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจหาตำแหน่งการรั่วไหลภายในภาชนะป้องกันปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (PCV) ที่เสียหายจากเหตุการณ์โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟุกุชิมะ โดยใช้หุ่นยนต์ร่วมกับเทคนิค Phased Array Vector Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) เพื่อวัดแผนที่เวกเตอร์ความเร็วของการไหลในของเหลวที่มีความขุ่นซึ่งไม่สามารถตรวจสอบด้วยกล้องได้ ระบบใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกแบบแบบอาเรย์ (Phased Array) ที่สามารถควบคุมทิศทางและจุดโฟกัสของลำคลื่นด้วยการปรับเวลาหน่วงของแต่ละองค์ประกอบ เพื่อสร้างแผนที่การไหลสองมิติจากความถี่ดอปเพลอร์ที่รับได้จากหลายองค์ประกอบของเซนเซอร์ นอกจากนี้ยังพัฒนาระบบระบุตำแหน่งของเซนเซอร์ด้วย Particle Filter ภายในแผนที่สภาพแวดล้อมที่ทราบล่วงหน้า โดยอาศัยการทำนายตำแหน่งและการปรับปรุงค่าจากข้อมูลการวัดระยะทาง ผลการทดสอบระบบระบุตำแหน่งในถังน้ำแสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.06 มิลลิเมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.82 มิลลิเมตร ซึ่งยืนยันความแม่นยำของระบบ หุ่นยนต์ต้นแบบถูกออกแบบให้มีฐานขับเคลื่อนสี่ล้อและแขนกล 3 องศาอิสระสำหรับเคลื่อนย้ายเซนเซอร์ไปยังตำแหน่งวัดต่าง ๆ พร้อมระบบควบคุมตำแหน่งจากมอเตอร์และตัวเข้ารหัสเชิงมุม การทดลองในชุดจำลองการรั่วไหลแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถระบุตำแหน่งของเซนเซอร์ได้อย่างถูกต้อง และสามารถสร้างแผนที่การไหลที่ชี้เข้าสู่ตำแหน่งรั่วไหล โดยพบว่าบริเวณหน้าช่องรั่วมีความเร็วการไหลสูงที่สุด แม้ว่าวิธี Phased Array Vector UVP จะสามารถสร้างแผนที่เวกเตอร์ความเร็วสองมิติได้ด้วยเซนเซอร์ขนาดเล็กเพียงตัวเดียว แต่ข้อจำกัดด้านความละเอียดเชิงเวลาทำให้การวัดเหมาะสำหรับการไหลคงตัวที่ต้องอาศัยการเฉลี่ยข้อมูลหลายครั้ง โดยสรุป ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถดำเนินการวัดการไหลจากระยะไกลและมีศักยภาพสำหรับการค้นหาตำแหน่งการรั่วไหลภายในสภาพแวดล้อมที่เข้าถึงได้ยากและมีรังสีสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

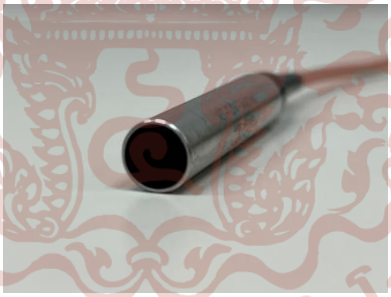
บทที่ 3
การปรับตั้งอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์สำหรับการวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็ว

บทนี้นำเสนอรายล่ะเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยในส่วนของการออกแบบและทดลองระบบการวัดจุดรั่วไหลด้วยเทคนิค UVP แบบ Multi-Element เพื่อศึกษาผลของการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ตัวส่งและตัวรับสัญญาณต่อประสิทธิภาพของการวัดและการประเมินความสามารถของระบบในการวัดจุดรั่วไหล เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยรายล่ะเอียดของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย การกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัด นอกจากนี้ยังอธิบายขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาผลของการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ ขั้นตอนการทดลองวัดจุดรั่วไหลภายใต้รูปแบบต่าง ๆ และขั้นตอนการทดลองวัดจุดรั่วไหลโดยใช้แขนกลสำหรับการควบคุมตำแหน่งการวัดอีกด้วย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer)

3.1.1.1 ทรานสดิวเซอร์สำหรับสร้างคลื่นเสียงความถี่สูง

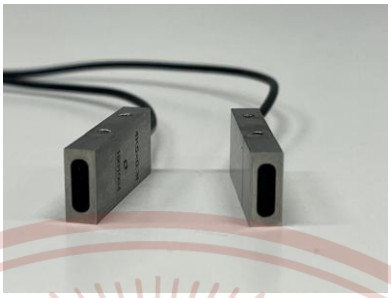


ภาพที่ 3-1 ทรานสดิวเซอร์สำหรับสร้างคลื่นเสียงความถี่สูง

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดทรานสดิวเซอร์สำหรับสร้างคลื่นเสียงความถี่สูง

รายการ	รายล่ะเอียด
รุ่น	Model: TX-4-5-8
ความถี่ใช้งาน	4 MHz
เส้นผ่านศูนย์กลาง	5 mm
ผู้ผลิต	MFG: Met-Flow, Lausanne, Switzerland

3.1.1.2 ทรานสดิวเซอร์สำหรับรับคลื่นเสียงความถี่สูง



ภาพที่ 3-2 ทรานสดิวเซอร์สำหรับรับคลื่นเสียงความถี่สูง

ตารางที่ 3-2 รายละเอียดทรานสดิวเซอร์สำหรับรับคลื่นเสียงความถี่สูง

รายการ	รายล่ะเอียด
รุ่น	Model: 4K5x0.3I
ความถี่ใช้งาน	4 MHz
ขนาดหัววัด	5x0.3 mm
ผู้ผลิต	Japan Probe, Japan

3.1.2 เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์และเครื่องรับสัญญาณ (Pulse & Receiver)

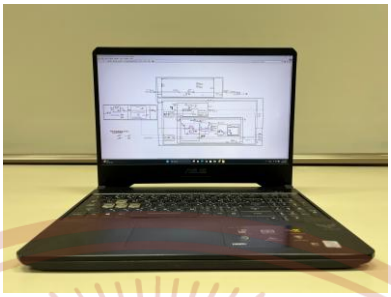


ภาพที่ 3-3 เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์และเครื่องรับสัญญาณ

ตารางที่ 3-3 รายละเอียดเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์และเครื่องรับสัญญาณ

รายการ	รายล่ะเอียด
รุ่น	Model: TIT-eUVP
ช่วงความถี่ที่รองรับ	0.5-10 MHz
รูปแบบการทำงาน	Pulse–Echo Mode
ช่องสัญญาณต่อหัววัด	BNC Connector 4 ช่อง

3.1.3 คอมพิวเตอร์สำหรับการประมวลผลและควบคุมแขนกล



ภาพที่ 3-4 คอมพิวเตอร์สำหรับการประมวลผล

ตารางที่ 3-4 รายละเอียดคอมพิวเตอร์สำหรับการประมวลผล

รายการ	รายล่ะเอียด
รุ่น	Model: ASUS FX505
ซอฟต์แวร์หลัก	NI LabVIEW 2025 & DobotStudio Pro
ผู้ผลิต	ASUSTeK Computer Inc.

3.1.4 แขนกล (Robot Arm)



ภาพที่ 3-5 แขนกล DOBOT MG400

ตารางที่ 3-5 รายละเอียดแขนกล

รายการ	รายล่ะเอียด
รุ่น	Model: DOBOT MG400
พื้นที่ทำงาน	440 × 440 × 170 mm
ความแม่นยำซ้ำ	±0.05 mm
รูปแบบการสื่อสาร	Modbus TCP/IP
ผู้ผลิต	DOBOT Robotics, China

3.1.5 อนุภาคติดตาม (Tracer Particles)



ภาพที่ 3-6 อนุภาคติดตามการไหล

ตารางที่ 3-6 รายละเอียดอนุภาคติดตามการไหล

รายการ	รายล่ะเอียด
รุ่น	Model: ORGASOL 0457
ความหนาแน่น	1.03 g/cc
ขนาดอนุภาคติดตาม	48–52 μm

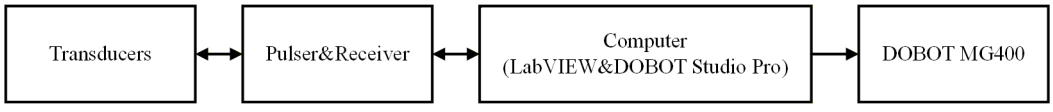
3.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ (Parameter Configuration)

ตารางที่ 3-7 รายละเอียดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	รายล่ะเอียด
Basic Frequency	4 MHz
Pulse Amplitude	140 Vp-p
Number of Cycles	4
Pulse Repetition Frequency	2 kHz
Number of Repetitions	128
Channel Width	2.22 mm
Sampling Rate	50 Ms/s

3.3 การทดลองปรับตั้งทรานสดิวเซอร์

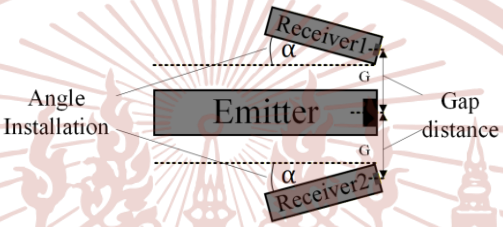
3.3.1 ลำดับการทำงานของระบบ



ภาพที่ 3-7 ระบบการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์

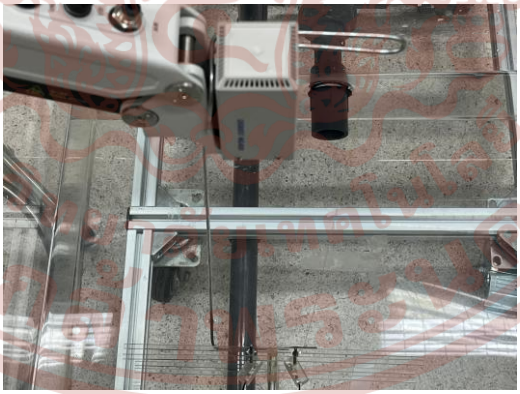
3.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อประเมินคุณภาพของสัญญาณสะท้อนโดยการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ พารามิเตอร์ที่ต้องการปรับตั้งมี 2 รูปแบบ คือ ระยะห่าง G ระหว่างทรานสดิวเซอร์ที่เป็นตัวส่งและตัวรับสัญญาณ และมุมการติดตั้ง α ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่อาจส่งผลต่อคุณภาพสัญญาณสะท้อนแสดงดังภาพที่ 3-8 ในการทดลองมีการปรับตั้งระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับอยู่ในช่วง 8 มิลลิเมตร ถึง 20 มิลลิเมตร และมุมการติดตั้งอยู่ในช่วง 0 ถึง 40 องศา

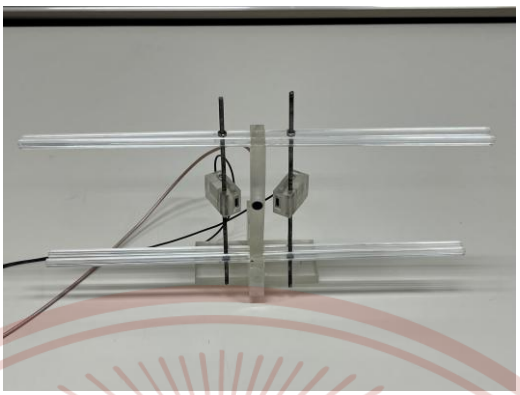


ภาพที่ 3-8 พารามิเตอร์การปรับตั้งทรานสดิวเซอร์

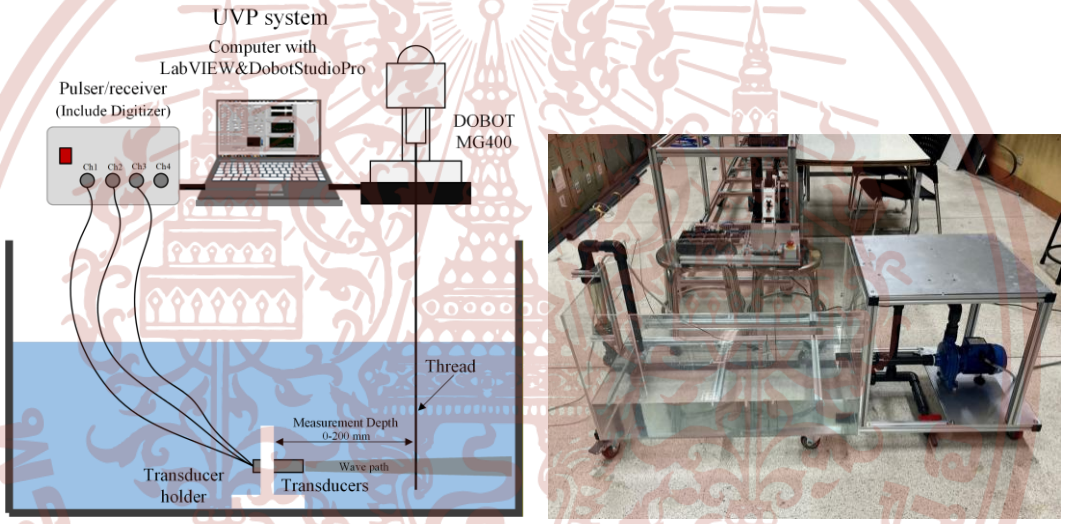
การประเมินคุณภาพของสัญญาณนั้นจะถูกพิจารณาจากสัญญาณดอปเพลอร์ที่ถูกประมวลมาจากสัญญาณสะท้อน การทดลองจะใช้เส้นด้ายที่ทำหน้าที่จำลองเป็นอนุภาคขนาดเล็กสำหรับสะท้อนคลื่นเสียงยึดเข้ากับโครงโลหะและติดตั้งไว้กับแขนกลแสดงดังภาพที่ 3-9 และควบคุมแขนกลเพื่อให้เส้นด้ายเคลื่อนที่ผ่านทรานสดิวเซอร์ที่ถูกติดตั้งบนตัวยึดและจุ่มลงในน้ำเพื่อสร้างสัญญาณดอปเพลอร์แสดงดังภาพที่ 3-10 และ ภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-9 การติดตั้งเส้นด้ายกับแขนกล

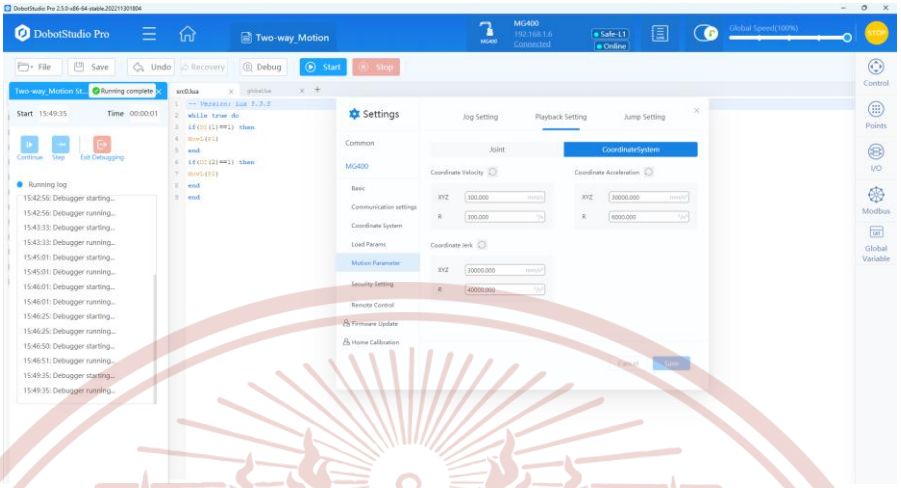


ภาพที่ 3-10 การติดตั้งทรานสดิวเซอร์กับตัวยึด

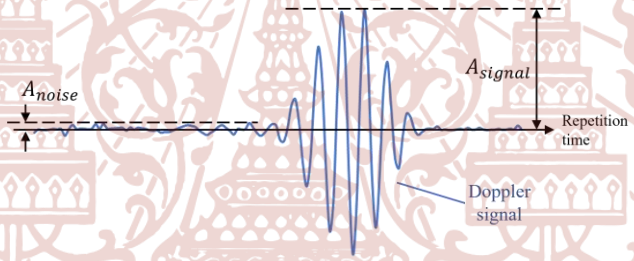


ภาพที่ 3-11 การตั้งค่าการทดลองสำหรับการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์

ความเร็วของแขนกลสามารถควบคุมได้ผ่านซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์ DobotStudio Pro แสดงดังภาพที่ 3-12 โดยกำหนดความเร็วการเคลื่อนที่ในการทดลองไว้ที่ 300 มิลลิเมตรต่อวินาที และกำหนดความลึกตลอดช่วงของการตรวจวัดไว้ที่ 0 ถึง 200 มิลลิเมตร ในการทดลองสัญญาณสะท้อนที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ผ่านของเส้นด้ายจะถูกประมวลผลผ่านโปรแกรม LabVIEW เพื่อแยกสัญญาณดอปเพลอร์สำหรับใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง สัญญาณดอปเพลอร์จะถูกนำมาใช้ในการประเมินโดยการหาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งตัวอย่างของสัญญาณดอปเพลอร์แสดงดังภาพที่ 3-13 เพื่อพิจารณาหาตำแหน่งการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ดีที่สุดและที่แย่ที่สุดที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 3-12 โปรแกรมควบคุมการทำงานแขนกล



ภาพที่ 3-13 ตัวอย่างสัญญาณดอปเพลอร์

3.4 การทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหล

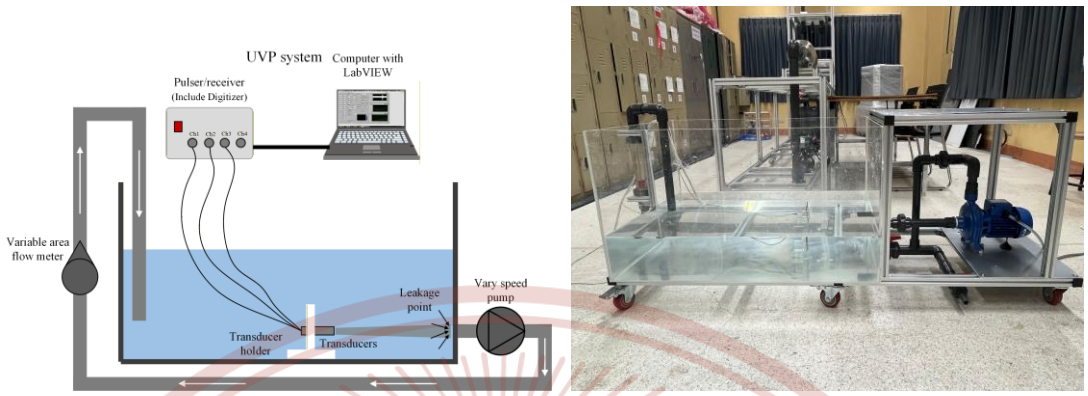
3.4.1 ลำดับการทำงานของระบบ



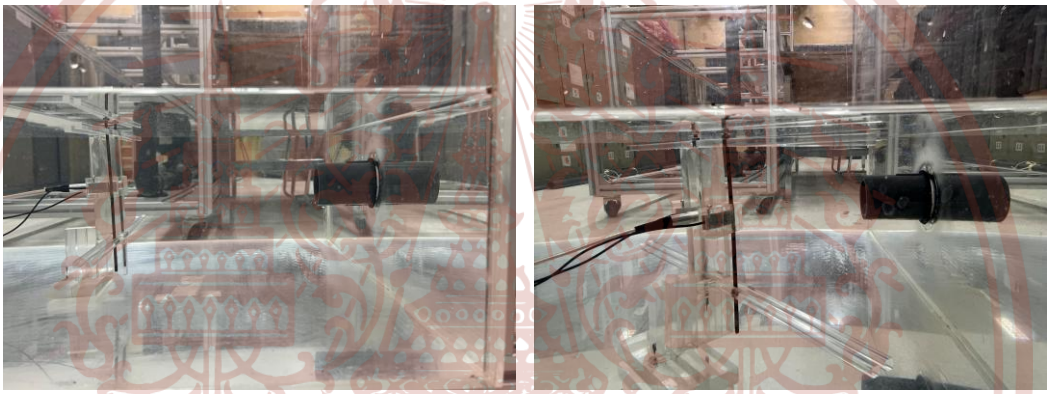
ภาพที่ 3-14 ระบบการวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหล

3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อวัดวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหล ในการทดลองจะทดลองกับถังน้ำรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ถูกสร้างขึ้น มีการเจาะรูด้านข้างถังและเชื่อมต่อกับปั๊มน้ำเพื่อจำลองตำแหน่งการรั่วไหลพร้อมกับใช้อินเวอเตอร์สำหรับควบคุมอัตราการไหลให้เท่ากับ 18 ลิตรต่อนาที ซึ่งวัดอัตราการไหลโดยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบพื้นที่แปรผัน (Variable Area Flow Meter) ตัวกลางของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือน้ำทีมีการเติมอนุภาคติดตามการไหลชนิดไนลอน ขนาด 50 ไมโครเมตร ทรานสดิวเซอร์จะถูกติดตั้งไว้กับตัวจับยึดและถูกวางลงในน้ำแสดงดังภาพที่ 3-15 และ ภาพที่ 3-16



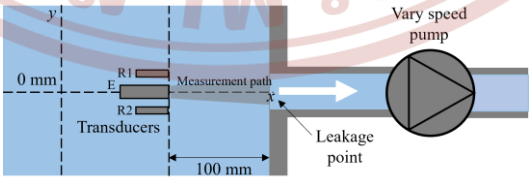
ภาพที่ 3-15 การตั้งค่าการทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็ว



ภาพที่ 3-16 ตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ในของเหลว

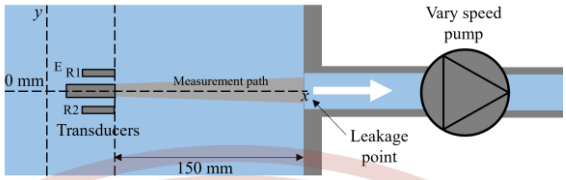
การทดลองนี้จะนำการปรับตั้งระยะห่าง G ระหว่างทรานสดิวเซอร์ตัวส่งและตัวรับสัญญาณและมุมการติดตั้ง α จากการทดลองก่อนหน้าที่เป็นการปรับตั้งที่ดีที่สุดจำนวน 2 รูปแบบ และการการปรับตั้งที่แย่ที่สุดจำนวน 2 รูปแบบ มาทำการทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหล โดยมีการติดตั้งระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์กับตำแหน่งจุดรั่วไหล 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

3.4.2.1 ทรานสดิวเซอร์ถูกวางไว้ที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 100 มิลลิเมตร. และ แกน Y เท่ากับ 0 มิลลิเมตร



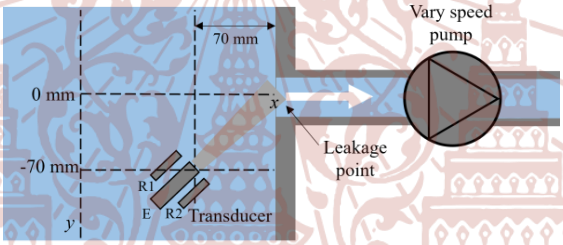
ภาพที่ 3-17 ตำแหน่งทรานสดิวเซอร์ X:100 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร

3.4.2.2 ทรานสดิวเซอร์ถูกวางไว้ที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 150 และแกน Y เท่ากับ 0 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3-18 ตำแหน่งทรานสดิวเซอร์ X:150 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร

3.4.2.3 ทรานสดิวเซอร์ถูกวางไว้ที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 70 และ แกน Y เท่ากับ -70 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3-19 ตำแหน่งทรานสดิวเซอร์ X:70 มิลลิเมตร. Y:-70 มิลลิเมตร

การทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วจะถูกประมวลผลผ่านโปรแกรม LabVIEW และจะใช้การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลความเร็วสำหรับประเมินความน่าเชื่อถือ ความเที่ยงตรงและความสามารถในการทำซ้ำของผลการทดลอง

3.5 การทดลองประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกล

3.5.1 ลำดับการทำงานของระบบ

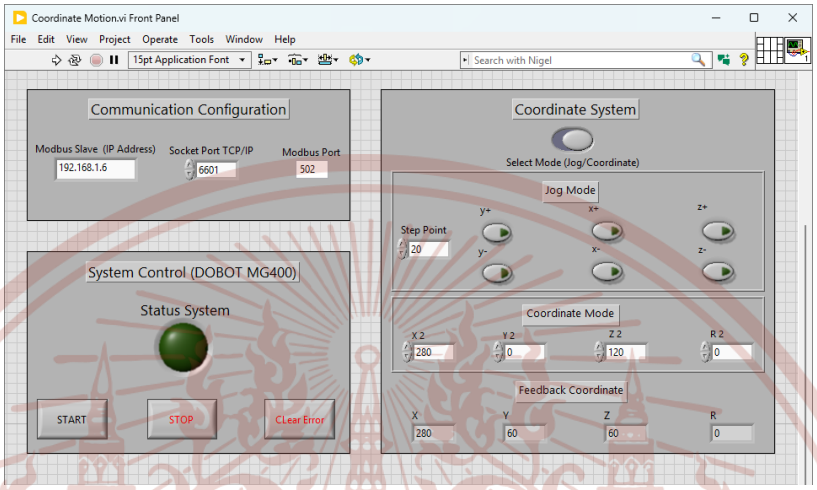


ภาพที่ 3-20 ระบบการประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกล

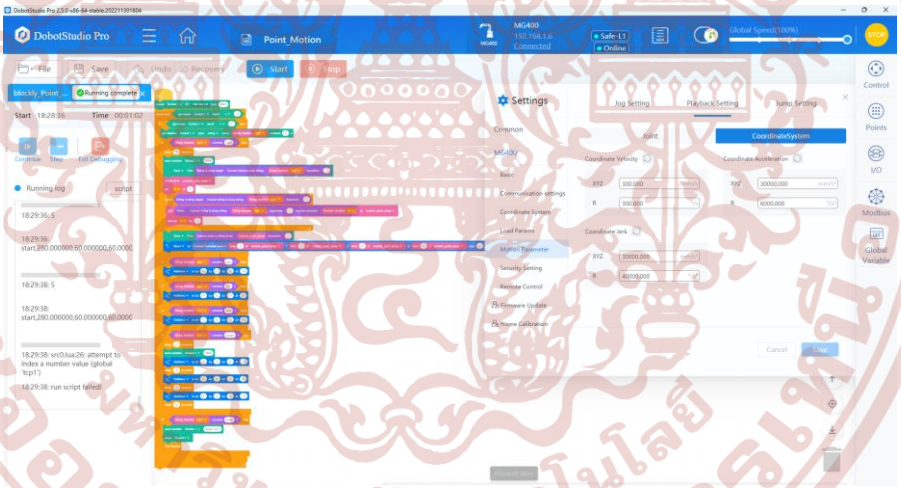
3.5.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อสาธิตการใช้แขนกลในการเคลื่อนที่ร่วมกับทรานสดิวเซอร์ที่ถูกติดตั้งกับตัวจับยึดเพื่อประเมินจุดรั่วไหล ซึ่งในการเคลื่อนที่ของแขนกลจะสามารถกำหนดการเคลื่อนที่ด้วยระบบพิกัดฉากและกำหนดองศาการหมุนของทรานสดิวเซอร์ในการวัดได้ด้วยการเขียนโปรแกรมสื่อสารระหว่างซอฟแวร์ LabVIEW และ DobotStudio Pro ด้วยรูปแบบการสื่อสารแบบ Modbus TCP ในการทำงานนั้นจะกำหนดพิกัดการเคลื่อนที่ผ่านโปรแกรม LabVIEW และจะส่ง

ข้อมูลพิกัดการเคลื่อนที่ให้กับโปรแกรม DobotStudio Pro เพื่อควบคุมการทำงานของแขนกล ตัวอย่างโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่แขนกลแสดงดังภาพที่ 3-21 และ ภาพที่ 3-22

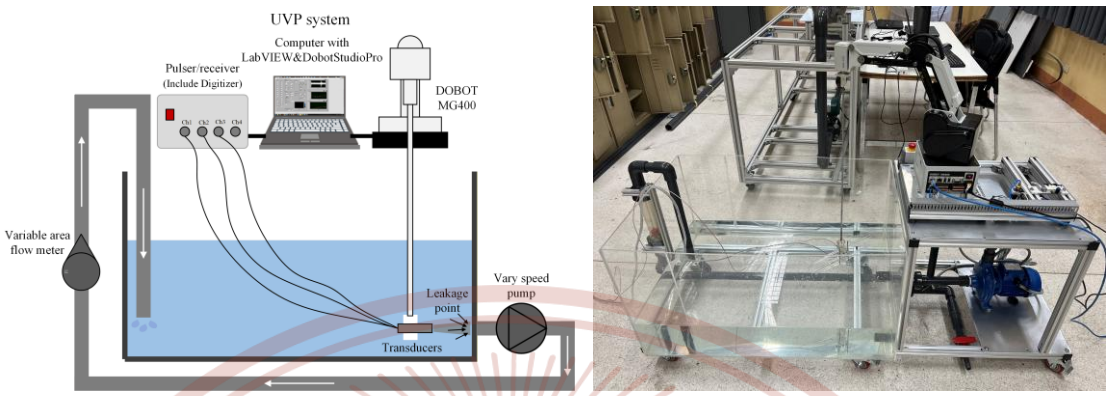


ภาพที่ 3-21 โปรแกรม LabVIEW สำหรับควบคุมแขนกล

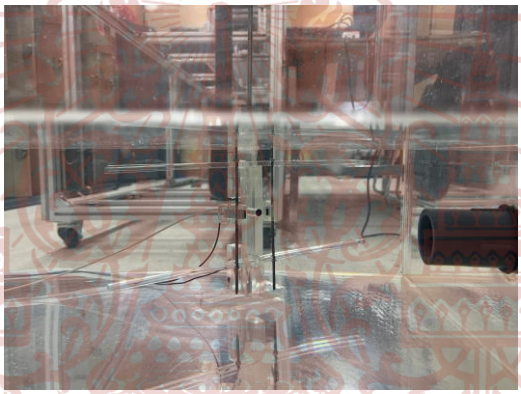


ภาพที่ 3-22 โปรแกรม DobotStudio Pro สำหรับควบคุมแขนกล

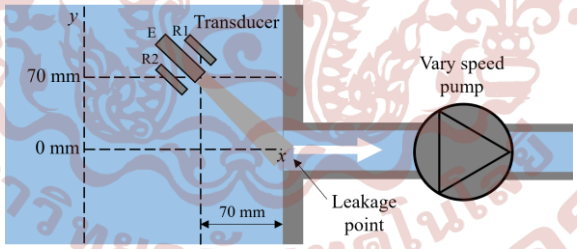
การทดลองนี้ทรานสดิวเซอร์จะถูกติดตั้งไว้กับตัวจับยึดพร้อมกับแขนกล และถูกวางลงในน้ำแสดงดังภาพที่ 3-23 และ ภาพที่ 3-24 โดยมีเงื่อนไขการทดลองเหมือนกับการทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลก่อนหน้านี้ในเรื่องของถังน้ำที่จำลองการรั่วไหล การควบคุมอัตราการไหล รวมไปถึงตัวกลางและอนุภาคติดตามที่ใช้ในการทดลอง การทดลองนี้จะนำการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ดีที่สุดเพียงตำแหน่งเดียวมาตรวจวัดการรั่วไหล 2 ทิศทาง แสดงดังภาพที่ 3-25 และภาพที่ 3-26 เพื่อจำลองการประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกล



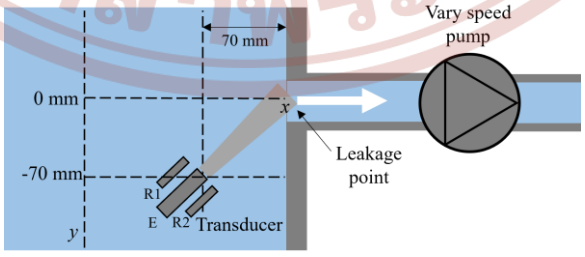
ภาพที่ 3-23 การตั้งค่าการทดลองประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกล



ภาพที่ 3-24 ตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ในของเหลว



ภาพที่ 3-25 ตำแหน่งทรานสดิวเซอร์กับแขนกล X:70 มิลลิเมตร. Y:70 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3-26 ตำแหน่งทรานสดิวเซอร์กับแขนกล X:70 มิลลิเมตร. Y:-70 มิลลิเมตร

บทที่ 4
ผลการทดลองการประเมินจุดรั่วไหลด้วยเทคนิค UVP

บทนี้นำเสนอผลการทดลองและการอภิปลายผลของระบบการวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วด้วยเทคนิด UVP แบบ Multi-Element ที่จัดทำขึ้นสำหรับการประเมินจุดรั่วไหลของเหลว นำเสนอเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในแต่ล่ะขั้นตอน ตั้งแต่การปรับตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด การวิเคราะห์ข้อมูลเวกเตอร์ความเร็วไปจนถึงการประยุกต์ใช้งานร่วมกับแขนกล ผลการทดลองจะนำเสนอเป็นลำดับเพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการประเมินจุดรั่วไหล โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การทดลองปรับตั้งทรานสดิวเซอร์เพื่อให้ได้ตำแหน่งและมุมการติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับการวัด การทดลองวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหล และการทดลองประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกล ซึ่งในแต่ละหัวข้อจะนำเสนอผลการทดลอง พร้อมทั้งอภิปรายผล

4.1 ผลการทดลองการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์

การปรับตั้งทรานสดิวเซอร์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิค UVP เนื่องจากตำแหน่งการติดตั้งของตัวส่งและตัวรับสัญญาณมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณสะท้อนที่ได้รับ ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการประเมินความเร็วของการไหล ดังนั้น ก่อนนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินจุดรั่วไหลจึงจำเป็นต้องพิจารณาหาตำแหน่งการติดตั้งที่สามารถให้สัญญาณสะท้อนที่มีคุณภาพดีที่สุด การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพของสัญญาณสะท้อนภายใต้เงื่อนไขการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่แตกต่างกัน ในการทดลองนี้ใช้การจำลองการเคลื่อนที่ของเส้นด้ายผ่านแนวลำคลื่นเสียงเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนแทนนุภาคติดตาม จากนั้นจะนำสัญญาณดอปเพลอร์ที่ได้จากการประมวลผลมาคำนวณหาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของสัญญาณสะท้อน โดยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงจะแสดงถึงคุณภาพสัญญาณสะท้อนที่ชัดเจนและมีสัญญาณรบกวนน้อย ทำให้เหมาะสมต่อการประมาณความเร็วของการไหล ในการทดลองจะศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ในการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ 2 ปัจจัย คือ มุมการติดตั้งระหว่างตัวส่งและตัวรับ ประกอบด้วย 5 ระดับ คือ 0 , 10 , 20 , 30 และ 40 องศา และระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับ ประกอบด้วย 7 ระดับ คือ 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 มิลลิเมตร สำหรับแต่ละเงื่อนไขของมุมและระยะห่างจะทำการตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณสะท้อนในช่วงระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์กับเส้นด้ายตั้งแต่ 0 ถึง 200 มิลลิเมตร โดยเก็บข้อมูลที่ตำแหน่ง 0, 5, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 และ 200 มิลลิเมตร และนำค่าที่ได้เหล่านี้มาคำนวณหาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการติดตั้ง

ในแต่ละเงื่อนไข วิธีการเก็บข้อมูลในการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 5 ตาราง ตามมุมการติดตั้งของทรานสดิวเซอร์ดังแสดงในภาพที่ 4-1,ภาพที่ 4-2ภาพที่ 4-3,ภาพที่ 4-4 และ ภาพที่ 4-5 โดยแต่ละตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างและมุมการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์กับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์และเลือกเงื่อนไขการติดตั้งที่ให้คุณภาพของสัญญาณสะท้อนที่ดีที่สุด ซึ่งจะนำไปใช้ในการติดตั้งสำหรับการทดลองวัดโพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วและการประเมินจุดรั่วไหลในหัวข้อถัดไป ผลการคำนวณอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดังแสดงในภาพที่ 4-6ภาพที่ 4-7,ภาพที่ 4-8,ภาพที่ 4-9 และ ภาพที่ 4-10

0 Degree	5 mm	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm	140 mm	200 mm
8 mm									
10 mm									
12 mm									
14 mm									
16 mm									
18 mm									
20 mm									

ภาพที่ 4-1 รายล่ะเอียดการเก็บข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 0 องศา

10 Degree	5 mm	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm	140 mm	200 mm
8 mm									
10 mm									
12 mm									
14 mm									
16 mm									
18 mm									
20 mm									

ภาพที่ 4-2 รายล่ะเอียดการเก็บข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 10 องศา

20 Degree	5 mm	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm	140 mm	200 mm
8 mm									
10 mm									
12 mm									
14 mm									
16 mm									
18 mm									
20 mm									

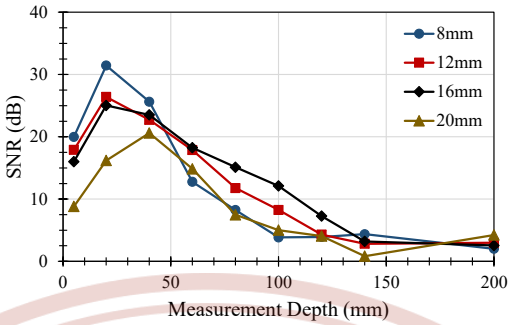
ภาพที่ 4-3 รายล่ะเอียดการเก็บข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 20 องศา

30 Degree	5 mm	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm	140 mm	200 mm
8 mm									
10 mm									
12 mm									
14 mm									
16 mm									
18 mm									
20 mm									

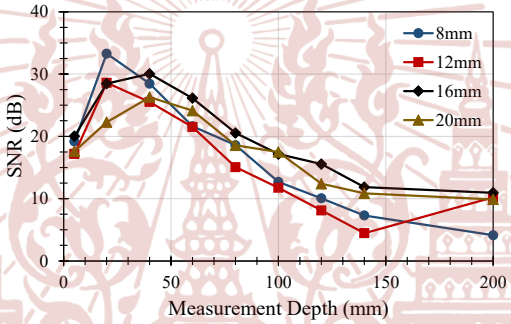
ภาพที่ 4-4 รายล่ะเอียดการเก็บข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 30 องศา

40 Degree	5 mm	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm	140 mm	200 mm
8 mm									
10 mm									
12 mm									
14 mm									
16 mm									
18 mm									
20 mm									

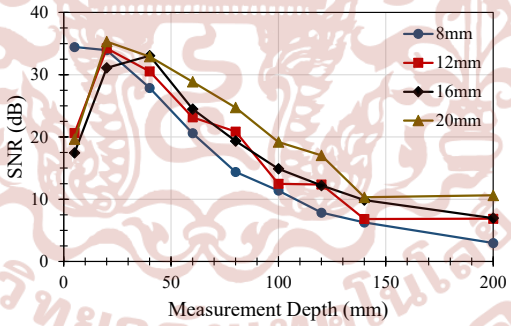
ภาพที่ 4-5 รายล่ะเอียดการเก็บข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 40 องศา



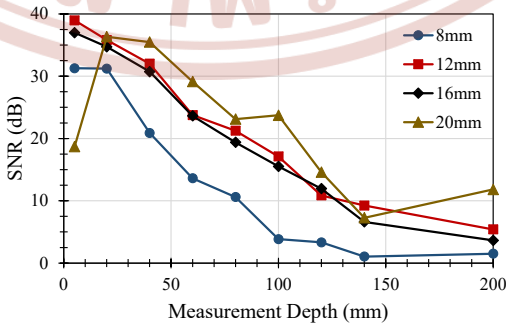
ภาพที่ 4-6 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 0 องศา



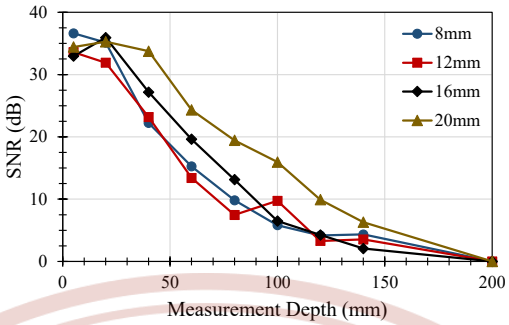
ภาพที่ 4-7 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 10 องศา



ภาพที่ 4-8 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 20 องศา



ภาพที่ 4-9 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 30 องศา



ภาพที่ 4-10 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 40 องศา

เพื่อประสิทธิภาพการวัดของเทคนิค UVP โดยทั่วไปในงานประมวลผลสัญญาณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่มีค่ามากกว่า 10 เดซิเบล มักถือว่าสัญญาณมีความโดดเด่นกว่าสัญญาณรบกวนเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์และประมาณค่าพารามิเตอร์ได้อย่างน่าเชื่อถือ จากภาพที่ 4-6 แสดงข้อมูลการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 0 องศา โดยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระหว่างความลึกในการวัด 0 ถึง 60 มิลลิเมตร มีค่าสูงกว่า 10 เดซิเบล แต่ที่ความลึกเกิน 100 มิลลิเมตร จะต่ำกว่า 10 เดซิเบล เมื่อมุมการติดตั้งเพิ่มขึ้นเป็น 10 องศา ดังแสดงในภาพที่ 4-7 ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระหว่างความลึกในการวัด 0 ถึง 100 มิลลิเมตร มีค่าสูงกว่า 10 เดซิเบล ของทั้งหมดในการปรับตั้งระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับ แต่ความลึกในการวัดที่เกิน 100 มิลลิเมตร ขึ้นไปเฉพาะระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับ 16 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร เท่านั้นที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า 10 เดซิเบล จากภาพที่ 4-8 แสดงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 20 องศา ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระหว่างความลึกในการวัด 0 ถึง 100 มิลลิเมตร มีค่าสูงกว่า 10 เดซิเบล อย่างไรก็ตาม หลังจากความลึกในการวัดที่ 140 มิลลิเมตร ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะต่ำกว่า 10 เดซิเบล ยกเว้นของการปรับตั้งระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ 20 มิลลิเมตร ที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนประมาณ 10 เดซิเบล ต่อเนื่องไปจนถึงความลึกในการวัดที่ 200 มิลลิเมตร เมื่อปรับตั้งทรานสดิวเซอร์เป็น 30 องศา ผลลัพธ์ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนแสดงดังภาพที่ 4-9 ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการปรับตั้งระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ 12 มิลลิเมตร 16 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร มีค่าที่ยอมรับได้จนถึงความลึก 120 มิลลิเมตร หลังจากความลึกนั้นพบว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนไม่อยู่ในเกณฑ์ 10 เดซิเบล เหมือนที่กำหนดไว้ สุดท้ายค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของมุมการติดตั้งที่ 40 องศา ผลลัพธ์ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนแสดงดังภาพที่ 4-10 ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการปรับตั้งระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ 8 มิลลิเมตร 12 มิลลิเมตร และ 16 มิลลิเมตร ต่ำกว่า 10 เดซิเบล เมื่อความลึกในการวัด100 มิลลิเมตร และความลึกก่อนหน้า

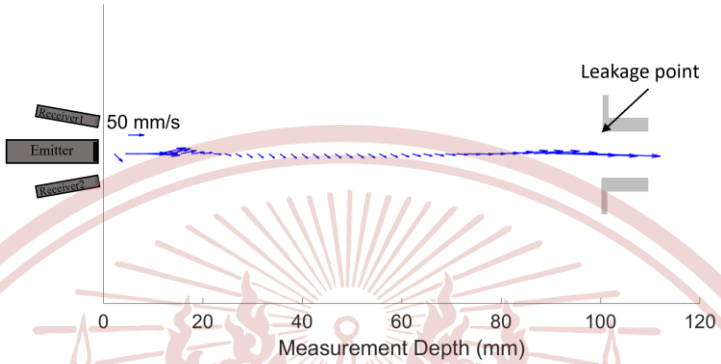
นั้นมีเพียงการปรับตั้งระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ 20 มิลลิเมตร เท่านั้น ที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดจนถึงความลึกในการตรวจวัดที่ 120 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองทั้งหมดการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ดีที่สุดคือการติดตั้งมุมระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ 10 องศา และระยะห่างระหว่างตัวส่งละตัวรับที่ 16 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ส่วนการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่แย่ที่สุดคือการติดตั้งมุมระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ 40 องศา และระยะห่างระหว่างตัวส่งละตัวรับที่ 8 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร การปรับตั้งเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการวัดในการทดลองถัดไป

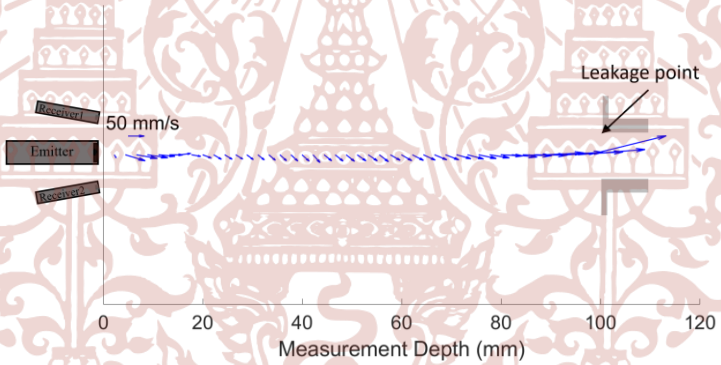
4.2 ผลการทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหล

การทดลองนี้เป็นการทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลจากการนำการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดมาทดลองวัด โดยการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ดีที่สุดคือการติดตั้งมุมระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ 10 องศา และระยะห่างระหว่างตัวส่งละตัวรับที่ 16 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ซึ่งจะเรียกการกำหนดแบบ A และ B ส่วนการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่แย่ที่สุดคือการติดตั้งมุมระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ 40 องศา และระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ 8 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร ซึ่งจะเรียกการกำหนดแบบ C และ D ตามลำดับในการทดลองนี้ ผลลัพธ์โพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคติดตามหรือของไหลจากการทดลองนี้จะเป็นการหาเฉลี่ยจากเวกเตอร์ความเร็วตามแนวแกนการสะท้อนของตัวรับสัญญาณที่ 1 และ 2 คือ V_1 และ V_2 จำนวน 1000 ครั้ง ก่อนนำไปสร้างเป็นเป็นโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วตามสมการที่กล่าวในบทที่ 2 และใช้การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับเวกเตอร์ความเร็วตามแนวแกนการสะท้อนของตัวรับสัญญาณ V_1 และ V_2 สำหรับประเมินความสามารถในการทำซ้ำของการวัด ผลการทดลองวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลจากการติดตั้งระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์และจุดรั่วไหล 3 รูปแบบ มีดังต่อไปนี้

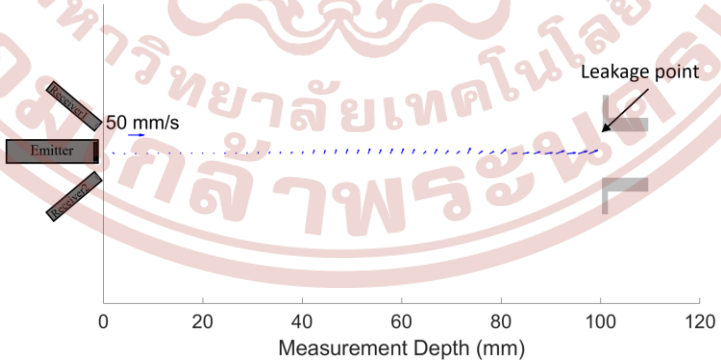
4.2.1 ผลการทดลองการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 100 มิลลิเมตร. และแกน Y เท่ากับ 0 มิลลิเมตร



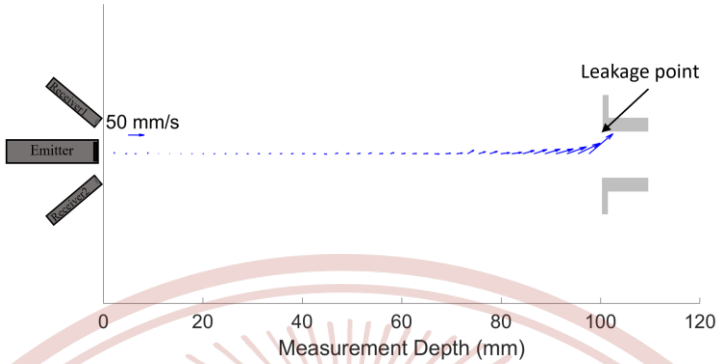
ภาพที่ 4-11 มุม 10 องศา ระยะห่าง 16 มิลลิเมตร X:100 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร



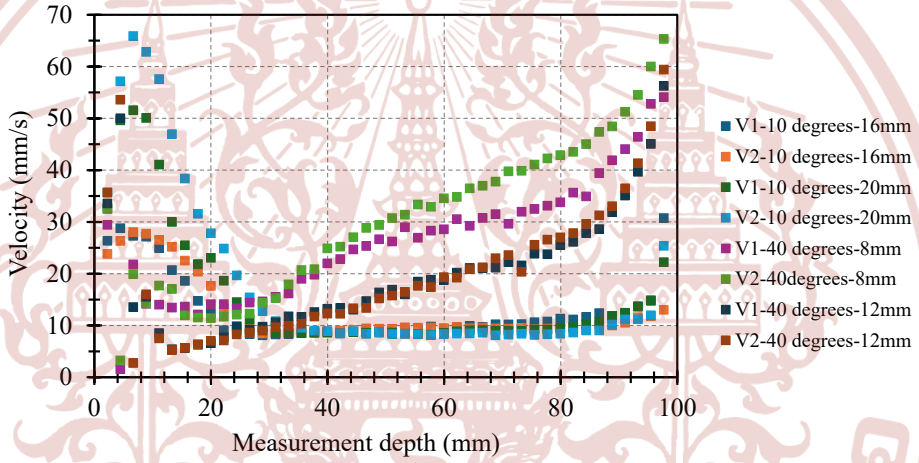
ภาพที่ 4-12 มุม 10 องศา ระยะห่าง 20 มิลลิเมตร X:100 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-13 มุม 40 องศา ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร X:100 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร



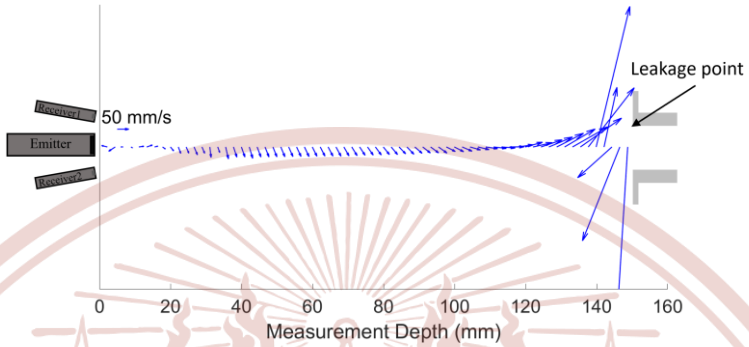
ภาพที่ 4-14 **มุม** 40 องศา ระยะห่าง 12 มิลลิเมตร X:100 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร



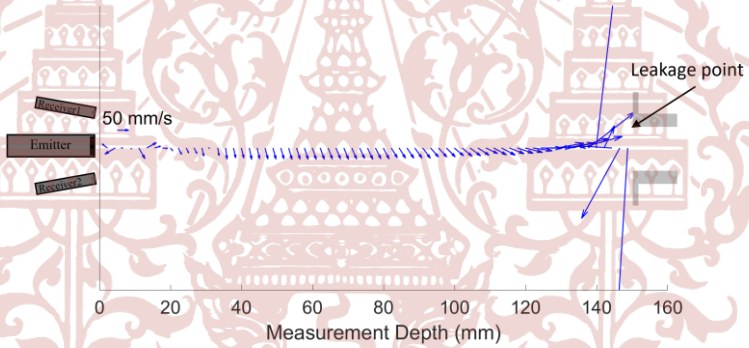
ภาพที่ 4-15 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเวกเตอร์ความเร็ว X:100 มิลลิเมตร Y:0 มิลลิเมตร

จากการทดลองการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 100 มิลลิเมตร. และ แกน Y เท่ากับ 0 มิลลิเมตร สำหรับการวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลด้วยการปรับตั้งทรานสดิเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบ ผลลัพธ์การปรับตั้งทั้งหมดสามารถแสดงให้เห็นความสามารถของการมองเห็นจุดรั่วไหลของของเหลวได้ แต่ผลลัพธ์ที่วัดได้จากรูปแบบ A และ B แสดงให้เห็นเวกเตอร์ความเร็วที่สมเหตุสมผลในเรื่องของขนาดและทิศทางการไหลเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากรูปแบบการกำหนดแบบ C และ D ซึ่งแสดงเวกเตอร์ที่ไม่ชัดเจน จากภาพที่ 4-15 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวกเตอร์ความเร็วตามแนวแกนการสะท้อนของตัวรับสัญญาณ V_1 และ V_2 ของทุกรูปแบบการปรั้งตั้ง แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความสามารถในการทำซ้ำของการวัดในการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์รูปแบบ A และ B ดีกว่ารูปแบบ C และ D

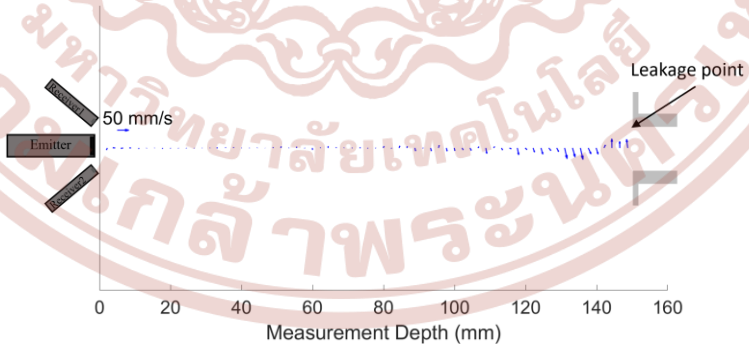
4.2.2 ผลการทดลองการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 150 มิลลิเมตร. และแกน Y เท่ากับ 0 มิลลิเมตร



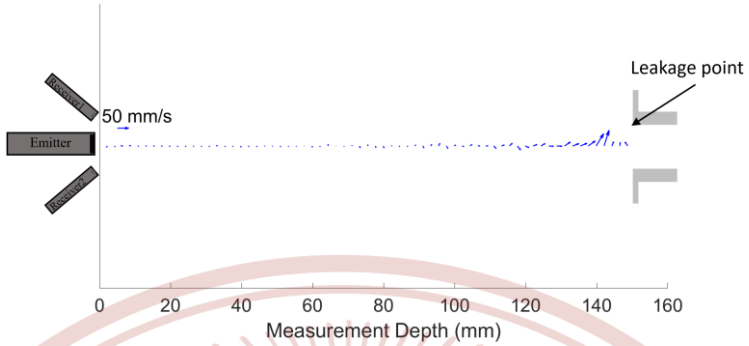
ภาพที่ 4-16 มุม 10 องศา ระยะห่าง 16 มิลลิเมตร X:150 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร



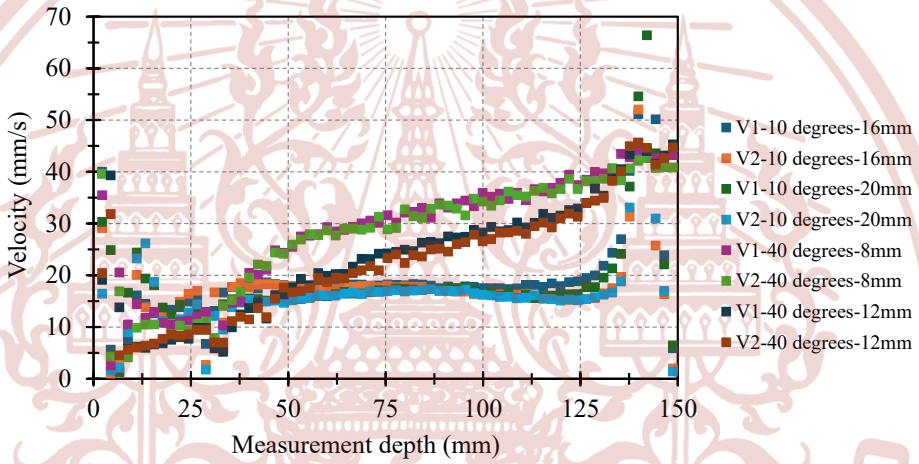
ภาพที่ 4-17 มุม 10 องศา ระยะห่าง 20 มิลลิเมตร X:150 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-18 มุม 40 องศา ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร X:150 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร



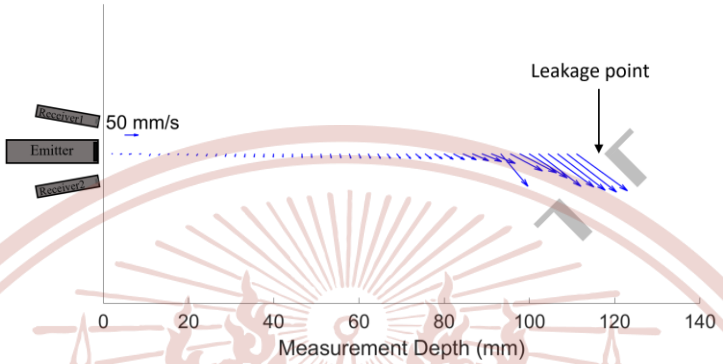
ภาพที่ 4-19 มุม 40 องศา ระยะห่าง 12 มิลลิเมตร X:150 มิลลิเมตร. Y:0 มิลลิเมตร



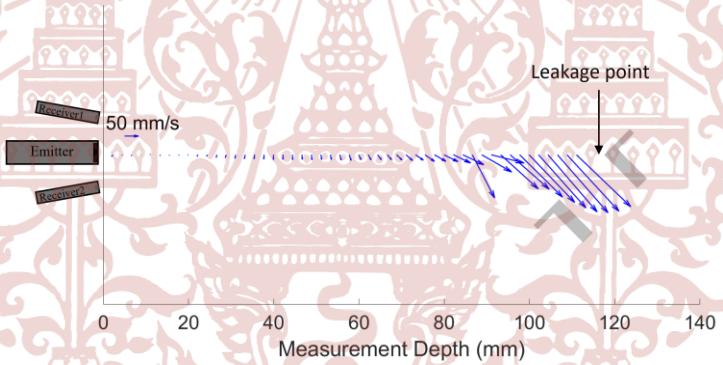
ภาพที่ 4-20 ค่าเบี่ยงเบนมารตฐานเวกเตอร์ความเร็ว X:150 มิลลิเมตร Y:0 มิลลิเมตร

จากการทดลองการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 150 มิลลิเมตร. และแกน Y เท่ากับ 0 มิลลิเมตร สำหรับการวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลด้วยการปรับตั้งทรานสดิเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่ายังสามารถวัดได้ที่ระยะความลึกเกินกว่า 100 มิลลิเมตร การปรับตั้งทรานสดิวเซอร์รูปแบบ A และ B นั้น ยั้งสามารถระบุจุดรั่วไหลได้แต่มีความแม่นยำที่ต่ำเนื่องจากสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคติดตามมีค่าต่ำ จากการทดลองก่อนหน้านี้ในส่วนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างในการติดตั้งทรานสดิวเซอร์กับจุดรั่วไหลมีค่ามากขึ้นซึ่งในกรณีการทดลองนี้คือ 150 มิลลิเมตร จะทำให้คุณภาพของสัญญาณสะท้อนต่ำลงหรืออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อยกว่า 10 เดซิเบล และสำหรับการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์รูปแบบ C และ D ไม่สามารถวัดจุดรั่วไหลได้ จากภาพที่ 4-20 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวกเตอร์ความเร็วตามแนวแกนการสะท้อนของตัวรับสัญญาณ V_1 และ V_2 ของทุกรูปแบบการปรับตั้ง แสดงให้เห็นความแปรปรวนในการตรวจวัดที่สูงซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการวัด

4.2.3 ผลการทดลองการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 70 มิลลิเมตร.แกน Y เท่ากับ -70 มิลลิเมตร และทำมุมเอียง 45 องศา กับจุดรั่วไหล



ภาพที่ 4-21 มุม 10 องศา ระยะห่าง 16 มิลลิเมตร X:70 มิลลิเมตร. Y:-70 มิลลิเมตร



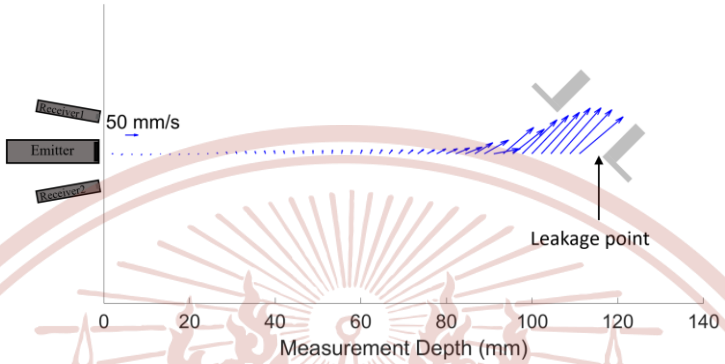
ภาพที่ 4-22 มุม 10 องศา ระยะห่าง 20 มิลลิเมตร X:70 มิลลิเมตร. Y:-70 มิลลิเมตร

จากการทดลองการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 70 มิลลิเมตร แกน Y เท่ากับ -70 มิลลิเมตร และทำมุมเอียง 45 องศา กับจุดรั่วไหล สำหรับการวัดโพรไฟล์ของเวกเตอร์ความเร็วและประเมินจุดรั่วไหลโดยนำการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ดีที่สุด 2 รูปแบบ คือ A และ B มาทดลองเพื่อประเมินจุดรั่วไหลและตรวจสอบความถูกต้องของทิศทางการไหลของของเหลว ซึ่งเวกเตอร์ความเร็วสามารถระบุทิศทางการไหลได้ดี ผลลัพธ์ของเวกเตอร์ความเร็วสามารถชี้ไปยังจุดรั่วได้อย่างชัดเจนและสอดคล้องกับทิศทางการไหลจริงของของเหลว

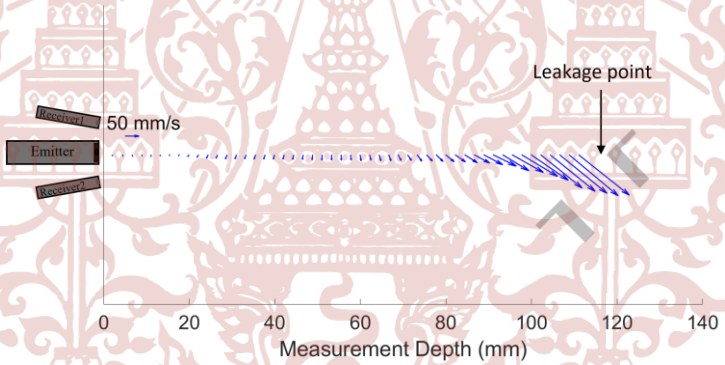
4.3 ผลการทดลองประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกล

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของระบบการวัดจุดรั่วไหลเมื่อทำงานร่วมกับแขนกล โดยแขนกลทำหน้าที่เคลื่อนย้ายชุดหัววัดทรานสดิวเซอร์ไปยังตำแหน่งที่กำหนดโดยการควบคุมผ่านโปรแกรมเพื่อจำลองการวัดจุดรั่วไหลภายใต้การเคลื่อนที่และการจัดวางตำแหน่งที่แม่นยำ ในการทดลองได้ปรับตั้งทรานสดิวเซอร์โดยใช้ค่าที่ดีที่สุดเพียงหนึ่งค่า คือ การติดตั้งมุมระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ 10 องศา และระยะห่างระหว่างตัวส่งละตัวรับที่ 16 มิลลิเมตร และกำหนด

ตำแหน่งติดตั้งหัววัดทรานสดิวเซอร์ 2 ตำแหน่ง ดังได้กล่าวในบทที่ 3 ผลการทดลองในการวัดแสดงดังภาพที่ 4-23ภาพที่ 3-23 และ ภาพที่ 4-24



ภาพที่ 4-23 ผลการวัดร่วมกับแขนกล X:70 มิลลิเมตร Y:70 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-24 ผลการวัดร่วมกับแขนกล X:70 มิลลิเมตร Y:-70 มิลลิเมตร

จากการทดลองการประเมินจุดรั่วไหลร่วมกับแขนกลผลลัพธ์ที่ได้ คือ สามารถควบคุมคุมแขนกลให้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่ต้องการได้ผ่านโปรแกรม LabVIEW และ DobotStudio Pro ผลการประเมินจุดรั่วไหลนั้นเวกเตอร์ความเร็วสามารถชี้ไปยังจุดรั่วได้อย่างชัดเจนและสอดคล้องกับทิศทางการไหลจริงของของเหลว

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อให้ได้โพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วแบบ 2 มิติ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อระบุจุดรั่วไหลของเหลว โดยใช้ชุดหัววัดทรานสดิวเซอร์แบบหลายอิลิเมนต์ที่ประกอบด้วยตัวส่งสัญญาณคลื่นเสียง 1 ตัว และ ตัวรับสัญญาณคลื่นเสียง 2 ตัว ทำงานร่วมกับเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์และเครื่องรับสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณ การประมวลข้อมูลถูกเขียนผ่านโปรแกรม LabVIEW การทดลองทำการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ในส่วนของระยะห่างและมุมการติดตั้งของตัวส่งและตัวรับสัญญาณเพื่อประเมินคุณภาพของสัญญาณสะท้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการวัด จากการทดลองระยะห่าง 16 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ที่มุมการติดตั้ง 10 องศา ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด และ ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร ที่มุมการติดตั้ง 40 องศา ให้ผลลัพธ์ที่แย่ที่สุด จากการพิจารณาและวิเคราะห์ผ่านค่าอัตราส่วนต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณสะท้อน จากนั้นทำการทดลองระบุจุดรั่วไหลของของเหลวโดยใช้การปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ดีที่สุดและแย่ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์และพบว่าการปรับตั้งดีที่สุดให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการปรับตั้งที่แย่ทีสุด และทดลองร่วมกับแขนกลเพื่อระบุจุดรั่วไหลด้วยการการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ดีที่สุดเพียงอย่างเดียว ผลลัพธ์ที่ได้โพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วสามารถระบุจุดรั่วไหลได้อย่างชัดเจน สุดท้ายจากการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้แนะนำอย่างยิ่งว่าการปรับตั้งทรานสดิวเซอร์เป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างยิ่งในการวัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อให้ได้โพรไฟล์เวกเตอร์ความเร็วสำหรับระบุจุดรั่วไหลของของเหลว

บรรณานุกรม

1. Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan: TEPCO Medium and long term road map for decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20171003.pdf, (in Japanese), (2017)
2. Chen, R. C., & Fan, L.-S. (1992). Particle image velocimetry for characterizing the flow structure in three-dimensional gas-liquid-solid fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, *47*(13–14), 3615–3622. https://doi.org/10.1016/0009-2509(92)85077-O
3. Takeda, Y. (1986). Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *7*(4), 313–318. https://doi.org/10.1016/0142-727X(86)90011-1
4. Eckert, S., & Gerbeth, G. (2002). Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound Doppler velocimetry. *Experiments in Fluids*, *32*(5), 542–546. https://doi.org/10.1007/s00348-001-0380-9
5. Kikuchi, K., Takeda, Y., Obayashi, H., Tezuka, M., & Sato, H. (2006). Measurement of LBE flow velocity profile by UDVP. *Journal of Nuclear Materials*, *356*(1–3), 273–279. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.05.028
6. Kikura, H., Takeda, Y., & Durst, F. (1999). Velocity profile measurement of the Taylor vortex flow of a magnetic fluid using the ultrasonic Doppler method. *Experiments in Fluids*, *26*(3), 208–214. https://doi.org/10.1007/s003480050281
7. Kikura, H., Kawachi, T., & Ihara, T. (n.d.). STUDY ON ULTRASONIC MEASUREMENT FOR DETERMINATION OF LEAKAGE FROM REACTOR VESSEL AND DEBRIS INSPECTION.
8. R. Nishiwaki, A. Hamdani, H. Takahashi, G. Endo, H. Kikura, Development of a Remote Water Leakage Localization System Combined with Phased Array UVP and Robot, 11th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Berlin, Germany (2018).

9. Andreev, O., Kolesnikov, Y., & Thess, A. (2009). Application of the ultrasonic velocity profile method to the mapping of liquid metal flows under the influence of a non-uniform magnetic field. *Experiments in Fluids*, *46*(1), 77–83. https://doi.org/10.1007/s00348-008-0540-2
10. Moriya, T., Kikura, H., & Takahashi, H. (n.d.). Basic study on ultrasonic remote leakage position estimation method for underwater exploration.
11. Mori, M., Takeda, Y., Taishi, T., Furuichi, N., Kikura, H., & Aritomi, M. (2002). Development of a novel flow metering system using ultrasonic velocity profile measurement. *Experiments in Fluids*, *32*(2), 153–160. https://doi.org/10.1007/s003480100295
12. Shwin, S., Hamdani, A., Takahashi, H., & Kikura, H. (2017). Experimental Investigation of Two-Dimensional Velocity on the 90° Double Bend Pipe Flow Using Ultrasound Technique. *World Journal of Mechanics*, *07*(12), 340–359. https://doi.org/10.4236/wjm.2017.712026
13. Nomura, S., Hitomi, J., Cesare, G. D., Murai, Y., Tasaka, Y., Takeda, Y., & Sakaguchi, H. (n.d.). *Instantaneous Flow Vector Measurement by a Pair of Ultrasound Doppler Instruments*.
14. Obayashi, H., Tasaka, Y., Kon, S., & Takeda, Y. (2008). Velocity vector profile measurement using multiple ultrasonic transducers. *Flow Measurement and Instrumentation*, *19*(3–4), 189–195. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2007.11.007
15. Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J., & Leylegian, J. C. (2011). *Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics* (8. ed). Wiley.
16. Kinsler, L. E. (Ed.). (2000). *Fundamentals of acoustics* (4th ed). Wiley.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายจิรายุทธ หาญโสด
ชื่อวิทยานิพนธ์	การประเมินจุดรั่วไหลของเหลวโดยการวัดอัลตร้าโซนิค
สาขาวิชา	วิศวกรรมอัตโนมัติ
ประวัติ	ปี 2561-2564 ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบเครื่องมือวัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ