

ผลของการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่มีต่อการวัดความเร็ว  
น้ำในท่อ การจำลองด้วย CFD

EFFECT OF INSTALLATION OF ULTRASONIC FLOW METER ON WATER  
VELOCITY MEASUREMENT IN PIPE THE CFD SIMULATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560  
KMITL-2017-EN-M-470-040

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่มีต่อการวัดความเร็ว  
น้ำในท่อ การจำลองด้วย CFD

EFFECT OF INSTALLATION OF ULTRASONIC FLOW METER ON WATER  
VELOCITY MEASUREMENT IN PIPE: THE CFD SIMULATION



T148684

พนธกร ศิริปริญญานันท์

PONTHAKORN SIRIPARINYANAN

เลขพญ. 148684  
ลงทะเบียน 14 พย. 2560  
วันเดือนปี

b. 00267600  
f.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-470-040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF INSTALLATION OF ULTRASONIC FLOW METER ON WATER  
VELOCITY MEASUREMENT IN PIPE: THE CFD SIMULATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันฯ ซึ่งสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่มีต่อการวัดความเร็วน้ำในท่อ  
การจำลองด้วย CFD

Thesis Title Effect of Installation of Ultrasonic Flow Meter on Water Velocity  
Measurement in Pipe : The CFD Simulation

นักศึกษา นายพนธกร ศิริปริญญาพันธ์

รหัสประจำตัว 59601301

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.นวกัทร่า หนูนา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสตัย

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-470-040

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.ยุทธพงศ์	ทัฬหะ	
รศ.ดร.ทวีพล	ชื้อสตัย	
ดร.เอกพงษ์	ชีวิตโสภณ	
ดร.เจษฎา	ชัยโณม	
รศ.ดร.นวกัทร่า	หนูนา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2560 เวลา 11.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการติดตั้งเครื่องมี้อัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่มีต่อการวัดความเร็วน้ำในท่อ การจำลองด้วย CFD
นักศึกษา	นายพนธกร ศิริปริญญาพันธ์
รหัสประจำตัว	59601301
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร.นวกัทธา หนูนาค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	รศ. ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลของการติดตั้งเครื่องมี้อัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่มุม (45 ถึง 85 องศา) และตำแหน่งที่ระยะอัสตริม 2D ถึง 20D และระยะดาว์นสตรีม 2D ถึง 10D ที่มีต่อความถูกต้องของการวัดความเร็วน้ำที่ไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ผ่านข้อต่อ 45 องศา ในทิศทางการไหลขึ้นและทิศทางการไหลลงที่ความเร็ว 0.2, 0.5 และ 1 เมตรต่อวินาที โดยเปรียบเทียบกับความเร็วที่ได้จากวิธีการซ่งน้ำหนักแบบสถิตย์ซึ่งใช้เป็นความเร็วอ้างอิง และนำเสนอการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จากผลการทดลองพบว่า โดยการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่มุมไม่เกิน 10 องศา จากคำแนะนำของผู้ผลิต มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ และการติดตั้งที่ระยะอัสตริมและระยะดาว์นสตรีมไม่ต่ำกว่า 14D และ 10D ตามลำดับ มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อการไหลมีความเร็วสูงขึ้น และท่อมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะติดตั้งเดียวกัน พบว่า การไหลผ่านข้อต่อในทิศทางขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าในทิศทางลง โดยแบบจำลองความปั่นป่วน SST  $k-\omega$  ในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยในรูปแบบสมการโพลีโนเมียล ซึ่งการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับสมการระยะอัสตริม ( $R^2 = 0.746$  และ  $SEE = 2.131$ ) และสมการสำหรับระยะดาว์นสตรีม ( $R^2 = 0.760$  และ  $SEE = 2.167$ ) มีค่าความแตกต่างระหว่างความคลาดเคลื่อนจากการประมาณและจากการทดลองไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of installation of ultrasonic flow meter on water velocity measurement in pipe: The CFD Simulation
Student	Mr.Ponthakorn Siriparinyanan
Student ID.	59601301
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Navapattra Nunak
Thesis Co – Advisor	Assoc. Prof. Dr.Taweepol Suesut

## ABSTRACT

This research proposes the effect of installation of ultrasonic flow meter at various path angles ( $45^\circ$  to  $85^\circ$ ), upstream distance (2D to 20D) and downstream distance (2D to 10D) on the water velocity measurement flowing through the elbow  $45^\circ$  in the upward and downward directions at the velocity of 0.2, 0.5 and 1.0 m/s in pipe diameter of 2.54 and 5.08 cm. The velocity obtained from ultrasonic flow meter and CFD simulation were compared with the velocity obtained from weighing method, which is the reference velocity. Results showed that the errors occurred from transducers mounting at the path angle being in the range of 10 degree from the producer recommendation were less than 4%. In case of the transducers installed at the upstream and downstream less than 14D and 10D, respectively, errors were less than 10%. Also, it was found that the error obtained from ultrasonic flow meter decreased as the increasing of water velocity and pipe diameter and the errors from water flowing through the elbow  $45^\circ$  in the upward direction were more than the downward directions. Considering the error estimation by CFD technique using the SST k- $\omega$  turbulent model and the error correction by polynomial regression equations for upstream ( $R^2 = 0.746$  and  $SEE = 2.131$ ) and downstream ( $R^2 = 0.760$  and  $SEE = 2.167$ ), the estimated errors were less than the ones obtained from the experiment 3%.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. นวภัทรา หนูนาค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา และขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ชือสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี และที่ขาดไม่ได้คือคณาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมอาหารทุกท่าน และวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูงที่ให้ความรู้และสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณการประปานครหลวงที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกสำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ พี่น้องและเพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจ และขอบคุณพี่ ๆ ในห้องปฏิบัติการ เช่น คุณเมธินี สงไทย์ และทุก ๆ คนที่เกี่ยวข้องสำหรับการความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์อื่นที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ผู้เขียนขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน และขอให้ทุก ๆ ท่านจงประสบแต่ความสุขความเจริญตลอดไป

พนธกร ศิริปริยญานันท์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร.....	5
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	5
2.1.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ .....	5
2.1.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Shear Stress Transport $k-\omega$ .....	7
2.2 เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน.....	8
2.2.1 หลักการทำงานของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลา ส่งผ่าน.....	8
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัด อัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก.....	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.3.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	12
2.3.2 เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	15
3.1 ชุดการทดลอง.....	15
3.1.1 การหาค่าชดเชยจากเวลาในการเปลี่ยนทิศทางการไหลของวาล์ว ควบคุมทิศทาง.....	15
3.1.2 การทดสอบการทำงานของชุดทดลอง.....	18
3.1.3 การควบคุมความเร็วการไหลของน้ำ.....	19
3.1.4 การหาค่าปรับแก้โดยเฉลี่ยการทำงานของวาล์วเปลี่ยนทิศทาง.....	19
3.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	20
3.2.1 การหาความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายที่เหมาะสม.....	25
3.2.2 การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน.....	27
3.3 วิธีการทดลอง.....	28
3.3.1 การทดสอบความถูกต้องและความเที่ยงตรงของการวัดความเร็วโดย เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก.....	29
3.3.2 มุมติดตั้งหรือระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์.....	30
3.3.3 ระยะอัปสตรีมและระยะดาวน์สตรีม.....	32
3.4 การวิเคราะห์ความถดถอย.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	35
4.1 ความถูกต้องและความเที่ยงตรงของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหล แบบอัลตราโซนิก.....	35
4.2 ผลของการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่มีต่อความถูกต้อง ของค่าความเร็วที่วัดได้.....	36
4.2.1 การติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลที่ระยะอัปสตรีมและระยะดาวน์สตรีม ต่าง ๆ.....	36
4.2.2 การติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่มีมุมขนาดต่าง ๆ.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แลวงอย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การประมาณความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	62
ประวัติผู้เขียน.....	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และกึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระยะการติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกตามตัวรบกวนต่าง ๆ.....	10
2.2 ความเร็วของคลื่นเสียงในน้ำอุณหภูมิต่างกัน.....	12
3.1 อุปกรณ์ในชุดทดลอง.....	17
3.2 ค่าปรับแก้โดยเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการทำงานของวาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหลที่ขนาดท่อและความเร็วต่าง ๆ.....	20
3.3 รายละเอียดการสร้างโครงสร้างตาข่าย.....	20
3.4 พารามิเตอร์ที่ป้อนในโปรแกรม ANSYS Fluent.....	24
3.5 การเปรียบเทียบความเร็วจากการทำนายของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและจากการซั่งน้ำหนักแบบสถิตย์.....	27
3.6 การเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและจากการซั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ตามมาตรฐาน ISO 4185.....	28
3.7 ระยะระหว่างอพสตรีมทรานสดิวเซอร์และตาว์นสตรีมทรานสดิวเซอร์ที่มุมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่าง ๆ.....	32
3.8 เงื่อนไขการทดลอง.....	33
4.1 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาทีในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร.....	37
4.2 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาทีในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร.....	38
4.3 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 1.0 เมตรต่อวินาทีในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาทีในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร.....	40
4.5 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร.....	41
4.6 เพอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ.....	42
4.7 เพอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลที่มุมติดตั้งต่าง.....	46
4.8 เพอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการทำนายความเร็วโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มุมติดตั้งต่าง ๆ.....	49
4.9 เพอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการทำนายความเร็วโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ.....	50
4.10 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ผ่านการปรับแก้แล้วกับค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากเครื่องมือวัดการไหลของท่อขนาด 5.08 เซนติเมตร ความเร็ว 0.2 และ 0.5 เมตรต่อวินาที.....	54

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการทำงานของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่านและจำนวนเส้นทางที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ระหว่างทรานสดิวเซอร์ 1 เส้น.....	8
3.1 ชุดทดลอง.....	16
3.2 ส่วนทดลองในทิศทางขึ้นและลง.....	17
3.3 ชุดทดลอง.....	18
3.4 ท่อจำลองจากโปรแกรม ANSYS.....	22
3.5 โครงสร้างตาข่ายบริเวณหน้าตัดท่อ.....	23
3.6 โครงสร้างตาข่ายแบบไร้ระเบียบมีความละเอียดระดับที่ 1 ถึง 4.....	26
3.7 ตัวอย่างการติดตั้งทรานสดิวเซอร์โดยมีมุมเท่ากับ 75 องศา.....	31
3.8 การวัดความเร็วของน้ำที่มุมในการติดตั้งต่างกัน.....	31
4.1 แนวเส้นการไหลหลังผ่านข้อต่อ 45 องศา.....	44
4.2 การไหลย้อนกลับในข้อต่อ 45 องศา ในทิศทางการไหลขึ้น.....	44
4.3 แนวเส้นการไหลแบบปั่นป่วนที่ตัวเลขเรย์โนลด์์ต่างกัน.....	44
4.4 ขนาดของมุมติดตั้งที่เปลี่ยนแปลง.....	47
4.5 ตัวอย่างภาพคอนทัวร์การไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที.....	45
4.6 ความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจากการทำนายและจากเครื่องมือวัดการไหลที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาที.....	53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปี พ.ศ. 2558 การประปานครหลวงผลิตน้ำประปามากถึง 1,835.13 ล้านลูกบาศก์เมตร สำหรับรองรับผู้ใช้น้ำ 2,226,707 ราย [1] ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าว การประปาต้องการความถูกต้องในการวัดปริมาณน้ำเพื่อประมาณต้นทุนในการผลิตน้ำประปา แต่เนื่องจากท่อในระบบประปาเป็นระบบท่อปิดที่มีขนาดใหญ่และมีการไหลอย่างต่อเนื่อง จึงต้องใช้เครื่องมือวัดการไหลที่สามารถวัดได้โดยไม่ต้องทำลาย ไม่ปรับเปลี่ยนท่อ หรือหยุดการไหลของน้ำภายในท่อ ซึ่งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกเป็นเครื่องมือวัดที่สามารถใช้วัดการไหลของน้ำในท่อขนาดใหญ่เพียงประกบจากภายนอกท่อ (Clamp-on) อีกทั้งการติดตั้งสำหรับการใช้งานไม่ขวางเส้นทางการไหลของน้ำ และมีความถูกต้องเที่ยงตรงสูง

ค่าความถูกต้องของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่าง ๆ ได้ เช่น อุณหภูมิของของไหลที่แตกต่างกัน ชนิดวัสดุของท่อ ความหนาของท่อ ความขรุขระที่ผิวท่อด้านใน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ วัสดุปกปิดท่อ (Pipe coating) การสะสมของสารตกค้างภายในท่อ ของไหลที่อยู่ในสถานะผสม (Mixture) และรูปแบบการไหลของของไหล เป็นต้น [2, 3, 4, 5, 6, 7] นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อความถูกต้องของการวัด นั่นคือ ลักษณะการติดตั้ง ได้แก่ มุม (Path angle) หรือระยะระหว่างออสตริมทรานสดิวเซอร์ (Upstream transducer) กับดาว์นสตรีมทรานสดิวเซอร์ (Downstream transducer) ระยะท่อตรงปราศจากการรบกวนการไหลก่อนถึงจุดติดตั้งเครื่องมือวัด หรือเรียกว่า “ระยะออสตริม (Upstream installation)” และระยะท่อตรงปราศจากการรบกวนการไหลหลังจุดติดตั้งเครื่องมือวัด หรือ เรียกว่า “ระยะดาว์นสตรีม (Downstream installation)” [6] ซึ่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกเพื่อวัดความเร็วน้ำภายในท่อประปา มักมีจุดติดตั้งอยู่บริเวณสะพาน ซึ่งมีข้อจำกัดด้านระยะออสตริมและดาว์นสตรีม รวมถึงอาจมีตัวรบกวนการไหลอื่น ๆ เช่น ข้อต่อ ข้องอ และวาล์ว เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความเร็วของของไหลภายในท่อ

โดยการประเมินความถูกต้องของการวัดความเร็วการไหลในท่อสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD) ในการจำลองการไหลเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก [8] การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างชุดทดลองจริงเพื่อประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก [9, 10] การใช้วิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ (Static weighing method) ตามมาตรฐาน ISO 4185 เพื่อเป็นความเร็วอ้างอิงสำหรับการไหลที่ถูกต้อง [11] และใช้ชุดทดลองเสมือนจริงจากการวิเคราะห์มิติสำหรับปรับขนาดชุดทดลองเพื่อประเมินความถูกต้องของเครื่องมือวัดการไหล [12, 13] ซึ่งแต่ละวิธีนั้นต่างมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นวิธีที่ใช้การจำลองการไหลภายในท่อจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องการชุดทดลอง สามารถแสดงผลเป็นภาพได้ และใช้เวลาน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ แต่ความถูกต้องขึ้นอยู่กับความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายและแบบจำลองความปั่นป่วน [14, 15] การใช้วิธีการชั่งแบบสถิตย์ตามมาตรฐาน ISO 4185 เป็นวิธีประเมินการไหลที่มีความถูกต้องมากที่สุด โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างมวลและปริมาตรของน้ำสำหรับการประเมินความถูกต้อง ซึ่งวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ร่วมกับชุดทดลอง โดยชุดทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ชุดทดลองจริงและชุดทดลองเสมือนจริง ซึ่งชุดทดลองจริงเป็นชุดทดลองที่ใช้ขนาดตามเงื่อนไขจริง จำเป็นต้องใช้เวลาในการออกแบบและสร้างชุดทดลองนาน รวมถึงต้องการค่าใช้จ่ายสูง แต่วิธีนี้สามารถประเมินความถูกต้องได้ใกล้เคียงสภาพจริงมากที่สุด หากชุดทดลองจริงมีขนาดใหญ่หรือเล็กเกินไป ส่งผลให้การทดลองตามเงื่อนไขจริงไม่สามารถทำได้ จึงจำเป็นต้องใช้ชุดทดลองเสมือนจริงจากการวิเคราะห์มิติ ซึ่งวิธีนี้เป็นการลดหรือขยายขนาดชุดทดลองจากเงื่อนไขจริงเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลอง โดยต้องมีตัวแปรบางตัวเสมือนกับสภาพจริง ซึ่งวิธีนี้สามารถลดเวลาการทดลอง และลดค่าใช้จ่ายได้ แต่คำตอบที่ได้เป็นคำตอบบางส่วนของปัญหาเท่านั้น จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจกับการทดลอง เพื่อให้ได้คำตอบที่สมบูรณ์ [16]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการจำลองการไหลภายในท่อเพื่อประเมินความถูกต้องของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกและใช้ความเร็วที่ได้จากวิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ตามมาตรฐาน ISO 4185 เป็นความเร็วอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับความเร็วจากการจำลองของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและความเร็วที่วัดได้จากเครื่องมือวัดการไหล

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของมุมหรือระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์ที่มีต่อการวัดความเร็วของน้ำภายในท่อด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 เพื่อประมาณค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมุมในการติดตั้ง ระยะอัฟสตรีม และระยะดาวน์สตรีมที่ไม่เหมาะสมของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดวัดเวลาส่งผ่านแบบยึดติดหัววัดกับผิวท่อภายนอก (Clamp on) ยี่ห้อ Fuji Electric system co., Ltd. รุ่น FSD220Y1

1.3.2 ระบบท่อทำจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ขนาด 2.54 เซนติเมตร (1 นิ้ว) หนา 2 มิลลิเมตร และท่อในส่วนทดลองประกอบด้วยข้อต่อ แบบ Double elbow 45 องศา ขนาด 2.54 เซนติเมตร (1 นิ้ว) และ 5.08 เซนติเมตร (2 นิ้ว) หนา 2 มิลลิเมตร

1.3.3 การไหลภายในท่อส่วนทดลองมีความเร็ว 0.2, 0.5 และ 1 เมตรต่อวินาที และมีลักษณะการไหลเต็มท่อ

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีการไหลของของไหลภายในท่อ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบบจำลองความปั่นป่วน เทคนิคการใช้โปรแกรมจำลองการไหล (ANSYS Fluent 16.0) วิธีประเมินความถูกต้องของเครื่องมือวัดการไหล และหลักการทำงานของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดวัดเวลาส่งผ่าน

1.4.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก การประเมินความถูกต้องของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหล และการประยุกต์ใช้การจำลองการไหลจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อประเมินความถูกต้องของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหล

1.4.3 ออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับวัดความเร็วการไหลของน้ำตามมาตรฐาน ISO 4185

1.4.4 ทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมกับการจำลองการไหลของน้ำภายในชุดทดลอง

1.4.5 ดำเนินการทดลองตามวิธีการศึกษา

1.4.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ทราบผลจากมุมหรือระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์ที่มีต่อการวัดความเร็วของน้ำภายในท่อด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

1.5.2 ได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมุมในการติดตั้ง ระยะอัฟสตรีม และระยะดาวน์สตรีมที่ไม่เหมาะสมของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

## 1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บท โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบบจำลองความปั่นป่วน ทฤษฎีคลื่นเสียง เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ การออกแบบและสร้างชุดทดลอง ขั้นตอนการทดลอง การทดลองเบื้องต้น และการจำลองการไหลโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จากเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการจำลองการไหลภายในท่อด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วอ้างอิงที่ได้จากวิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ตามมาตรฐาน ISO 4185 และการใช้การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis) ในการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### 2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นการใช้คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหา แก้ปัญหาในด้านพลศาสตร์ของไหลโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่มีพื้นฐานมาจากระบบสมการนาเวียร์-สโตก (Navier-Stoke equations) ซึ่งพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเพียงการทำนายการไหลของของไหลเท่านั้น ไม่สามารถเข้ามาแทนการทดลองหรือทฤษฎีต่าง ๆ ได้ จึงเหมาะสำหรับเป็นเครื่องมือที่ช่วยเสริมความเข้าใจและยืนยันผลจากการทดลองและทฤษฎี [14] โดยความแม่นยำของการทำนายการไหลขึ้นกับหลายปัจจัยและหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญ คือ แบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้ ซึ่งแบบจำลองความปั่นป่วนมีหลายแบบ แต่ละแบบมีข้อจำกัดการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในกรณีที่มีความซับซ้อนไม่มากนัก แบบจำลองที่ใช้ควรเป็นชนิด 2 ตัวแปร ได้แก่ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\omega$

##### 2.1.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  เป็นแบบจำลองที่ใช้งานทั่วไปในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วน สามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  มาตรฐาน หรือ STD  $k-\epsilon$  แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Renormalization group  $k-\epsilon$  และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable  $k-\epsilon$  [14, 17]

2.1.1.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  มาตรฐาน (STD  $k-\epsilon$ ) ใช้สำหรับช่วยในการคำนวณสมการความต่อเนื่องและสมการ RANS หรือ Reynolds-averaged navier-stokes ที่มีรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน โดยแบบจำลองความปั่นป่วนนี้มีตัวแปร 2 ตัว คือ พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy;  $k$ ) และอัตราการกระจายตัวของพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Dissipation rate of turbulent kinetic energy;  $\epsilon$ ) ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้ต้องการเพียงเงื่อนไขขอบเขตเท่านั้น จึงได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยสามารถใช้ได้กับการไหลแบบหมุนวน และใช้ได้ดีสำหรับการไหลแบบ Free-shear layer ที่มีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวของความดันที่ไม่มาก [17] แบบจำลองชนิดนี้ให้ผลการทำนายการไหลเพียงเบื้องต้น ซึ่งสามารถให้ข้อมูล

ได้ดีในเชิงคุณภาพเท่านั้น เช่น การทำนายหรือวิเคราะห์การไหลของของไหลชนิดต่าง ๆ ผ่านเครื่องมือวัดการไหลแบบออร์ฟิส [18, 19] การทำนายการไหลในท่อกลมเพื่อหาค่าขดเขยให้เครื่องมือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูฎาตเ้หนาไปไซ่ประะเขยขนดานการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดการไหล [8] และการทำนายการไหลของของไหลผ่านเครื่องมือการวัดแบบอัลตราโซนิก [15] โดยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-ε มาตรฐานแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.2)$$

2.1.1.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Renormalization group หรือ RNG k-ε ได้มาจากการประยุกต์ใช้เทคนิคทางสถิติร่วมกับระบบสมการนาเวียร์-สโตก ซึ่งมีความแตกต่างจากแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-ε มาตรฐาน เนื่องจากสามารถวิเคราะห์อิทธิพลของการหมุนวนที่มีต่อการไหลแบบปั่นป่วนได้ จึงทำให้สามารถทำนายการไหลที่มีลักษณะการหมุนวนได้ดีกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-ε มาตรฐาน ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้ได้เพิ่มพจน์  $\varepsilon$  เข้ามาเป็นสิ่งที่ทำให้การทำนายการไหลแบบเกิดความเครียดอย่างรวดเร็วได้ถูกต้องมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถทำนายผลได้ดีในสภาวะการไหลที่เส้นทางการไหล (Stream line) มีความโค้งสูง และอัตราความเครียดสูง การไหลในช่วงเปลี่ยนแปลง (Transitional flow) การไหลที่ผนังมีการถ่ายเทความร้อนและมวล และการไหลของที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แบบจำลองชนิดนี้จึงนิยมใช้งานในการไหลที่ต้องการความถูกต้องมากกว่าแบบจำลอง STD k-ε เช่น การทำนายการไหลของของไหลผ่านเครื่องมือการวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก (Temperley et al., 2004) และการทำนายการไหลในท่อกลมผ่านช่องต่าง ๆ [20] เป็นต้น โดยสมการของแบบจำลองชนิดนี้แสดงดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_s \quad (2.4)$$

2.1.1.3 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable k-ε พัฒนามาจากแบบจำลอง STD และ RNG k-ε โดยมีจุดเด่นคล้ายกับแบบจำลอง STD k-ε แต่สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าและสามารถลู่เข้า (Converge) ได้ง่ายกว่าทั้ง 2 ชนิดก่อนหน้า เนื่องจากมีการปรับเปลี่ยนขอบเขตทางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณิตศาสตร์ แบบจำลองชนิดนี้มักใช้ในงานที่ต้องการข้อมูลเชิงปริมาณที่มีความแม่นยำในระดับหนึ่ง เช่น การทำนายค่าผิดพลาดของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลที่ของไหลในท่อกลม [21] การทำนายการไหลแบบชั่วคราวในท่อพลาสมาเจโร [22] เป็นต้น โดยสมการของแบบจำลองชนิดนี้ แสดงดังสมการที่ 2.5 และ 2.6 [17]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_k - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (C_{3\epsilon}) P_b - S_\epsilon \quad (2.6)$$

### 2.1.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST หรือ Shear Stress Transport k- $\omega$

แบบจำลองความปั่นป่วน Shear stress transport k- $\omega$  เป็นหนึ่งในแบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการแก้ปัญหาในอุตสาหกรรมอย่างมาก เนื่องจากได้รับการปรับปรุงการทำนายการไหลบริเวณผิวท่อให้มีความแม่นยำมากขึ้น ส่งผลให้สามารถทำนายการไหลที่มีความซับซ้อนได้ถูกต้องมากขึ้น โดยแบบจำลองชนิดนี้มีความแม่นยำมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ Reynolds-averaged navier-stokes equation สำหรับแก้ปัญหการไหล [17] โดยมีตัวแปรพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน และตัวแปรอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนจำเพาะ (Specific dissipation rate;  $\omega$ ) แบบจำลองชนิดนี้มักใช้กับงานที่ต้องการความถูกต้องของข้อมูลสูง เช่น การทำนายอุณหภูมิจากของไหลเพื่อแสดงถึงการไหลภายในท่อ [23] เป็นต้น โดยสมการของแบบจำลองความปั่นป่วน Shear stress transport k- $\omega$  แสดงในสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$t_{AB} = \frac{L}{c+v\cos(\theta)} \quad (2.9)$$

$$t_{BA} = \frac{L}{c-v\cos(\theta)} \quad (2.10)$$

$$V_{line} = \frac{L(t_{AB}-t_{BA})}{t_{AB} \times t_{BA} \times 2 \cos(\theta)} \quad (2.11)$$

โดย  $t_{AB}$  คือ เวลาส่งผ่านจากทรานสดิวเซอร์ A ไป B (วินาที)

$t_{BA}$  คือ เวลาส่งผ่านจากทรานสดิวเซอร์ B ไป A (วินาที)

$L$  คือ ระยะทางที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่จากทรานสดิวเซอร์ตัวแรกไปยังตัวที่สอง (เมตร)

$c$  คือ ความเร็วเสียงในของไหลที่อุณหภูมิต่าง ๆ (เมตรต่อวินาที)

$v$  คือ ความเร็วในการไหลของของไหลในท่อ (เมตรต่อวินาที)

$\theta$  คือ มุมในการติดตั้ง (องศา)

$V_{line}$  คือ ความเร็วที่เครื่องอัลตราโซนิกอ่านได้ (เมตรต่อวินาที)

## 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการวัดความเร็ว

เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกเป็นเครื่องมือวัดของไหลที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับของไหลหลายชนิด ทั้งในสถานะแก๊ส ของเหลว ของผสมหลายเฟส (Multiphase mixtures) โดยไม่มีข้อจำกัดใด ๆ แต่เครื่องมือวัดการไหลชนิดนี้ต้องมีระยะการติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในแต่ละเงื่อนไข ทั้งในส่วนของระยะอัปสตรีมและระยะดาวน์สตรีม โดย Fluid Components International (FCI) [25] ได้แนะนำระยะการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกตามตัวรบกวน (Disturbance) ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1

ความถูกต้องของการวัดความเร็วขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิของของไหลที่แตกต่างกัน ชนิดวัสดุของท่อ ความหนาของท่อ ความขรุขระภายในท่อ วัสดุปกปิดท่อ การกัดกร่อนของท่อ การสะสมของสารตกค้างภายในท่อ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของไหล รูปแบบการไหลของของไหล สถานะของของไหล และระยะระหว่างทรานสดิวเซอร์ เป็นต้น [2]

ตารางที่ 2.1 ระยะการติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกตามตัวרבกวนชนิดต่าง ๆ [16]

ตัวרבกวน	ท่อขนาดเล็กกว่า 6 นิ้ว		ท่อขนาดใหญ่กว่า 6 นิ้ว	
	ระยะอัฟสตรีม	ระยะดาว์นสตรีม	ระยะอัฟสตรีม	ระยะดาว์นสตรีม
ตัวרבกวนที่ไม่สามารถระบุได้ <sup>1</sup>	20D	10D	15D	7.5D
ช่องอ 45 องศาหรือ 90 องศา	15D	7.5D	10D	5D
ช่องอ 45 องศาหรือ 90 องศา แบบ Out of plane	20D	10D	15D	5D
ตัวควบคุมการไหลหรือวาล์ว	20D	10D	15D	5D
ท่อลด	15D	5D	10D	3D
ท่อขยาย	20D	10D	15D	5D

<sup>1</sup> ตัวרבกวนที่ไม่ได้อยู่ในข้อกำหนดด้านบน

### 2.2.2.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็นตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องของการวัดความเร็วของของไหลภายในท่อ โดยท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงมีแนวโน้มความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วมากขึ้น ซึ่งสามารถสรุปผลจากการศึกษาของนักวิจัยต่าง ๆ ได้ ดังนี้

- Cairney [7] พบว่า เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกสามารถใช้วัดความเร็วของของไหลในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 35 มิลลิเมตร ได้ดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ  $\pm 3$  เปอร์เซ็นต์ จากค่าอัตราการไหลจริงจากการทดลอง

- Baker [3] พบว่า เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกสามารถใช้วัดความเร็วของของไหลในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร ได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ถึง 50 มิลลิเมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 มิลลิเมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ  $\pm 3$  เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Svenson and Delsing [4] พบว่า เครื่องวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกสามารถใช้วัดความเร็วของของไหลในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ถึง 60.2 มิลลิเมตร และมีตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 10,000 โดยมีค่าเบี่ยงเบนประมาณ  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์จากอัตราการไหลจริง และที่ตัวเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 10,000 มีค่าเบี่ยงเบนประมาณ  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์จากอัตราการไหลจริง

#### 2.2.2.2 ระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์ (มุมในการติดตั้ง) และจำนวน Path

มุมในการติดตั้งและจำนวน Path ของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกต่อความถูกต้องในการวัด โดยเมื่อมุมการติดตั้งมากกว่า 45 องศา ค่าความถูกต้องของการวัดความเร็วมีค่าลดลง และจำนวน Path ที่มากขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มความถูกต้องของการวัดความเร็วสูงขึ้น [6]

#### 2.2.2.3 คุณลักษณะการไหล

คุณลักษณะการไหลสามารถแบ่งได้จากตัวเลขเรย์โนลด์ที่แตกต่างกัน โดยจากการศึกษาของ [9] พบว่า การไหลของน้ำในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.6 มิลลิเมตร ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่างกัน ส่งผลต่อค่าความถูกต้องของการวัดความเร็วของการไหลด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก ดังนี้

- ตัวเลขเรย์โนลด์ 10 ถึง 50 ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 28 เปอร์เซ็นต์
- ตัวเลขเรย์โนลด์ 50 ถึง 500 ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 10 เปอร์เซ็นต์
- ตัวเลขเรย์โนลด์ 500 ถึง 3,000 ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่  $\pm 3$  เปอร์เซ็นต์
- ตัวเลขเรย์โนลด์ 3,000 ถึง 100,000 ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่  $\pm 1$  เปอร์เซ็นต์

โดยสามารถสรุปได้ว่า เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มากขึ้น ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนในการวัดความเร็วของเครื่องมือวัดการไหลน้อยลง

#### 2.2.2.4 อุณหภูมิของเหลว

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในของเหลวส่งผลให้โมเลกุลมีพลังงานจลน์ที่มากขึ้น การส่งต่อคลื่นเสียงระหว่างโมเลกุลจึงเร็วมากขึ้น ทำให้ความเร็วของคลื่นเสียงที่ใช้ในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่น้อยลง ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ค่าความเร็วที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความคลาดเคลื่อน โดยความเร็วของเสียงที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2.2 [24] ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างจากอุณหภูมิห้องมาก ส่งผลให้แนวโน้มความถูกต้องของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดมีค่าลดลง

ตารางที่ 2.2 ความเร็วของคลื่นเสียงในน้ำอุณหภูมิต่างกัน [24]

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วเสียง (เมตรต่อวินาที)
0	1,402
10	1,447
20	1,482
30	1,509
40	1,529

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

สิบสกุล คุรุรัตน์ และคณะ [26] ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST k- $\omega$  และ k- $\epsilon$  ในการทำนายการไหลภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส 3 มิติโดยเปรียบเทียบกับวิธี Direct numerical method (DNS) ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองทั้ง 2 แบบให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกันผลการทำนายของ SST k- $\omega$  มีความใกล้เคียงกับ DNS มากที่สุด โดยพฤติกรรมการลู่เข้าของแบบจำลองความปั่นป่วน SST k- $\omega$  มีความรวดเร็วมากกว่าและมีการแกว่งของข้อมูลที่น้อยกว่า

Holm et al. [8] ทดลองประมาณค่าขดเขยสำหรับเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกโดยเปรียบเทียบกับผลจากการทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งในการทดลองใช้น้ำเป็นตัวกลางไหลอยู่ภายในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.24 มิลลิเมตร และติดตั้งตัวรบกวน คือ ข้องอด้านเดียว (Single elbow) และข้องอ 2 ด้านนอกระนาบ (Double elbow out of plane) ซึ่งตัวรบกวนมีระยะห่างจากจุดวัดความเร็ว 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง การไหลมีตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าตั้งแต่ 100 ถึง 100,000 โดยนำค่าความเร็วจากการวัดของเครื่องมือวัดมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายความเร็วในการไหลโดยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- $\epsilon$  ซึ่งผลการทดลอง พบว่า การใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้าช่วยในการประมาณค่าขดเขยนั้นสามารถทำได้ และให้ผลค่อนข้างดี

Temperley et al. [27] ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายความเร็วการไหลและเปรียบเทียบกับค่าความเร็วที่ได้จากเครื่องมือวัด Laser Doppler Velocimetry เพื่อนำไปออกแบบรูปทรงของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ โดยรูปทรงของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์เปรียบเสมือนตัวรบกวนการไหล ในการทดลองใช้น้ำเป็นของไหลภายในท่อขนาด 23.2 มิลลิเมตร โดยลักษณะการไหล

แบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ ราบเรียบ เปลี่ยนแปลง และปั่นป่วน โดยมีตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 750,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3,000, และ 7,500 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลอง พบว่า ผลจากการวัดความเร็วจากเครื่องมือวัดและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน และพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณยังแสดงให้เห็นว่า เกิดการไหลแบบหมุนวนเป็นบริเวณกว้างภายในท่อหลังตัวรับกวนซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่สามารถทราบได้ หากไม่ใช้การทำนายจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Shah et al. [19] ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาลักษณะการไหลของของไหลทั้งน้ำและอากาศที่ผ่านเครื่องมือวัดการไหลแบบออริฟิซ (Orifice meter) ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออริฟิซและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ได้แก่ 0.081, 0.162, 0.4065 และ 0.5 โดยทำการทดลองให้น้ำไหลในท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วในการไหลที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับอากาศ โดยการไหลของน้ำใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.3 มิลลิเมตร มีความเร็วในการไหล 0.376 ถึง 3 เมตรต่อวินาที และการไหลของอากาศใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 และ 50.8 มิลลิเมตร ความเร็วในการไหล 11.344 ถึง 28.087 เมตรต่อวินาที การทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณใช้แบบจำลองความปั่นป่วน STD k- $\epsilon$  ซึ่งผลการทดลอง พบว่า พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณให้ผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการไหลในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

Wang et al. [6] ทำการวิจัยโดยใช้เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิคชนิดเวลาส่งผ่านกับท่อขนาดใหญ่ (12.4 เมตร) ที่มีระยะอัดสริมและควาน์สริมที่สั้นกว่ากำหนด ซึ่งทำการทดลองโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง มีความเร็วในการไหล 7 เมตรต่อวินาที มุมในการติดตั้งของเครื่องมือวัด 65 องศา มีจำนวน Path 18 เส้น และสร้างแบบจำลองขนาดเล็กของอัตราส่วน 1:24 จากทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงมิติและสภาพความคล้าย เพื่อเปรียบเทียบความเร็วจากการทำนายการไหลจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับความเร็วที่วัดได้จากเครื่องมือวัด ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ว่า การใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการประเมินผลจากการติดตั้งที่ไม่เหมาะสมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากความเร็วจากการทำนายและจากการวัดมีความแตกต่างกันไม่มากอย่างมีนัยสำคัญ

Wang et al. [28] ใช้อัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกที่ได้จากการทดลองและจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาเปรียบเทียบเพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการหาค่าชดเชย โดยการทดลองใช้เครื่องมือวัดการไหลแบบกังหัน (Turbine flow meter) เป็นตัวอ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลที่วัดได้จาก Metering cylinder และอัตราการไหลที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยปรับเปลี่ยนความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบระหว่าง 11 ถึง 25 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งมีอัตราการไหล 7.2 ถึง 16.5 ลิตรต่อนาที จากการทดลองสรุปได้ว่า ค่าชดเชยที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นในช่วงที่มีอัตราการไหลต่ำ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

Carlander and Delsing [9] ทำการทดลองเพื่อหาผลของการติดตั้งอุปกรณ์หรือท่อชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อการวัดอัตราการไหลจากเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางไหลในท่อขนาด 25.6 มิลลิเมตร โดยมีการทดลอง 4 ชุด 1) ช่องอัด้านเดียวห่าง 11 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนถึงเครื่องมือวัด 2) ช่องอสองด้านนอกระนาบห่าง 11 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนถึงเครื่องมือวัด 3) การลดขนาดท่อห่าง 13 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนถึงเครื่องมือวัด 4) การไหลเป็นช่วง โดยมีระยะอัดสตรึมยาว 48 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทุกเงื่อนไข และมีความเร็วการไหลตั้งแต่ 2.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ถึง 11 เมตรต่อวินาที ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 25 ถึง 110,000 ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลอง พบว่า ที่อัตราการไหลต่ำ ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงและมีสิ่งรบกวน (Noise) สูง

Ishikawa et al. [11] ทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกวัดอัตราการไหลในท่อขนาด 0.53 มิลลิเมตร ที่ปริมาตรการไหล 0.1 ถึง 2 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นตัวกลางอุณหภูมิ  $22 \pm 1$  องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ และประเมินความถูกต้องด้วยวิธีซึ่งน้ำหนักแบบสถิติด้วยเครื่องซึ่งความละเอียดสูงตามมาตรฐาน ISO 4185 เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทดลองได้รับการออกแบบพิเศษเพื่อให้ใช้ในการทดลองกับท่อขนาดเล็กได้ โดยผลการทดลอง พบว่า ความถูกต้องของการวัดการไหลโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกสามารถวัดอัตราการไหลได้ต่ำสุดถึง 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที โดยแนวโน้มความถูกต้องเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลมากขึ้น

Ruppel and Peters [5] ทำการทดลองหาค่าความถูกต้องของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ระยะอัดสตรึมที่สั้นกว่าข้อกำหนด โดยการทดลองใช้ความเร็วจากการวัดของเครื่องมือวัดการไหลแบบเวนทูรีเป็นค่าอ้างอิง ใช้น้ำเป็นตัวกลางที่ไหลอยู่ภายในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร มีตัวรบกวน คือ ช่องอ 90 องศา (90 degree bend) และช่องอ 90 องศา 2 อัน (Double bend) ที่ขนาดของช่องอทั้งสองชนิดมีอัตราส่วน 1.5 เท่าของรัศมี โดยมีระยะอัดสตรึมและระยะดาวน์สตรึมเป็น 36 และ 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ตามลำดับ โดยตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 150,000 ถึง 300,000 จากการทดลอง พบว่า ช่องอทั้ง 2 ชนิดเป็นสิ่งที่มีความผลอย่างมากต่อลักษณะการไหล และระยะก่อนถึงเครื่องมือวัดที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มลดลง

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบชุดทดลองสำหรับการวัดความเร็วของน้ำภายในท่อ วิธีการวัดความเร็วจากเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก การคำนวณความเร็วจากวิธีการซั่งแบบสถิตย์ และการทำนายการไหลโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ รวมถึงอธิบายวิธีการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเร็วทั้งหมดสำหรับวัดความถูกต้องในการวัดความเร็วของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

#### 3.1 ชุดทดลอง

##### 3.1.1 อุปกรณ์ทดลอง

เครื่องมือวัดการไหลที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน ซึ่งอาศัยความแตกต่างของเวลาที่คลื่นเสียงใช้เคลื่อนที่ในทิศตามและทวนการไหล โดยเครื่องมือวัดการไหลที่ใช้มีช่วงการวัดความเร็วอยู่ที่ 0.3 ถึง 32 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิของไหล -40 ถึง 200 องศาเซลเซียส ขนาดท่อสำหรับวัดอัตราการไหล 13 ถึง 6,000 มิลลิเมตร ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 ถึง 50 มิลลิเมตร ในช่วงความเร็ว 0 ถึง 2 เมตรต่อวินาที มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง  $\pm 0.03$  ถึง  $\pm 0.05$  เมตรต่อวินาที และในช่วงความเร็ว 2 ถึง 32 เมตรต่อวินาที มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ  $\pm 0.5$  ถึง  $\pm 1.0$  เปอร์เซ็นต์ของความเร็วการไหล และมีค่าความละเอียดเท่ากับ 0.001 เมตรต่อวินาที

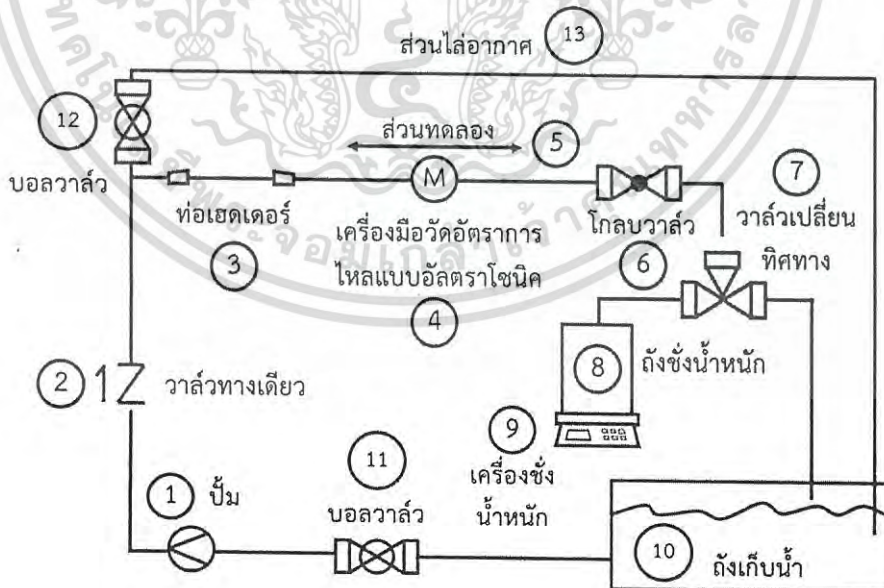
ชุดทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ร่วมกับงานวิจัยเรื่อง “การสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบสูบน้ำจ่ายน้ำประปาเพื่อประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก” ของนายรัฐโชติ วชิรปัญญาพันธ์ รหัสนักศึกษา 59601302 นักศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยชุดทดลองประกอบด้วยส่วนสำคัญ (รูปที่ 3.1) ดังนี้

- บั๊มแบบหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขนาด 2 แรงม้า ที่ควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์
- วาล์วทางเดียวสำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร
- ท่อเฮดเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร (4 นิ้ว) ยาว 1.1 เมตร มีหน้าที่ช่วย

ให้การไหลของน้ำภายในท่อส่วนทดลองเต็มท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

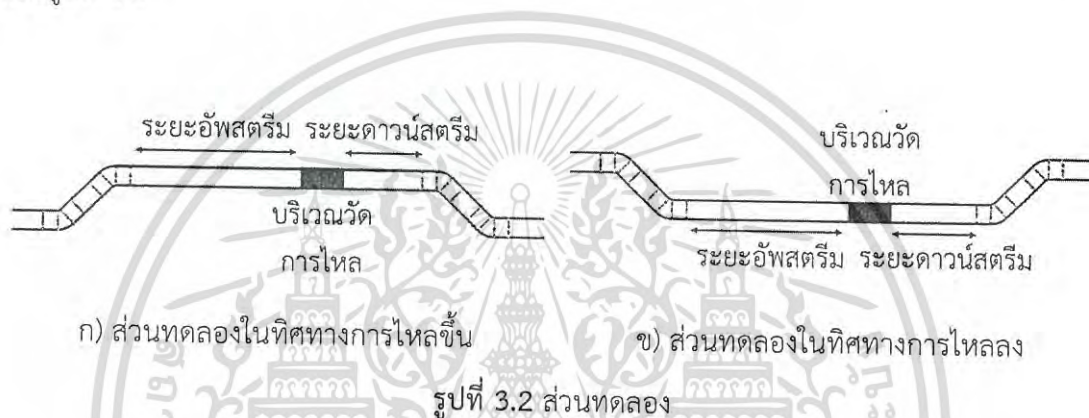
- เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน
- ระบบท่อทั้งหมดที่ใช้สำหรับการหมุนเวียนน้ำทำจากโพลีไวนิลคลอไรด์ โดยท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร และระบบท่อในส่วนทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร
- โกลบวาล์วสำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร มีหน้าที่ช่วยให้การไหลของน้ำภายในท่อส่วนทดลองเต็มท่อ
- วาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหล ซึ่งมีค่าทอร์คสูงสุด 2 นิวตันเมตร กำลังสูงสุด 5 วัตต์ แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ 220 โวลต์ ทนแรงดันสูงสุด 1 เมกะปาสคาล อุณหภูมิตัวกลาง 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของน้ำให้เข้าถึงเก็บน้ำ หรือ ถึงถังน้ำหนัก
- ถังชั่งน้ำหนักปริมาตร 0.02 ลูกบาศก์เมตร ขนาด 18×26×45 เซนติเมตร
- เครื่องชั่งน้ำหนัก มีความละเอียด 1 กรัม และวัดมวลได้สูงสุด 30 กิโลกรัม
- ถังเก็บน้ำทรงกระบอกปริมาตร 0.2 ลูกบาศก์เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร สูง 65 เซนติเมตร
- บอลวาล์วสำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร จำนวน 2 ตัว
- ท่อส่วนใส่อากาศซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร



รูปที่ 3.1 ชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยระบบท่อในส่วนทดลอง ประกอบด้วย ข้อต่อ 45 องศา และท่อตรง ซึ่งมีทั้งหมด 2 ชุดทดลอง โดยมีขนาดท่อที่แตกต่างกัน คือ 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร และระยะอัดสตรึมความยาว 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและระยะคานว่สตรึมความยาว 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ Fluid components international (FCI) [25] โดยชุดทดลองติดตั้ง 2 รูปแบบ คือ การติดตั้งส่วนทดลองที่มีข้อต่อ 45 องศา ทิศทางการไหลขึ้นและทิศทางการไหลลง ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งข้อต่อในทิศทางการไหลขึ้นและลงเปรียบเสมือนเป็นท่อสำหรับข้ามสะพานและท่อฝังใต้ดินตามลำดับ โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ในชุดทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.3



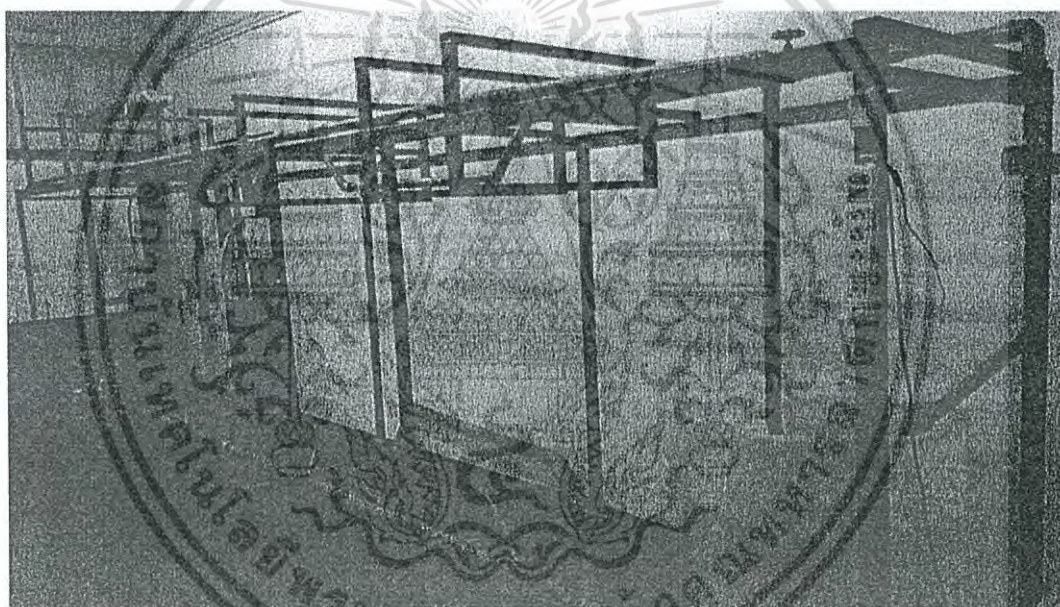
ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ในชุดทดลอง

หมายเลข	รายละเอียด
1	ปั๊มแบบหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Mitsubishi Electric Automation WCM-1505T) ขนาด 2 แรงม้า ควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ ((Fuji Electric FA FRNO. 2C1S-7A))
2	วาล์วทางเดียวสำหรับท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร
3	ท่อเฮดเดอร์ขนาด 10.16 เซนติเมตร (4 นิ้ว) ยาว 1.1 เมตร
4	เครื่องมือการวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน (Fuji Electric system co., Ltd. FSD220Y1)
5	ระบบท่อในส่วนทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร
6	โกลบวาล์วสำหรับท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร
7	วาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหลสำหรับท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร (Nutork NTE - 20S DN 25 - B3)
8	ถังขังน้ำหนักรวม 0.02 ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

หมายเลข	รายละเอียด
9	เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.001 กิโลกรัม (CST: CDR-30)
10	ถังเก็บน้ำปริมาตร 0.2 ลูกบาศก์เมตร
11	บอลวาล์วสำหรับท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร
12	บอลวาล์วสำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร
13	ท่อส่วนไล่อากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร



รูปที่ 3.3 ชุดทดลอง

### 3.1.2 การทดสอบการทำงานของชุดทดลอง

ก่อนทำการทดลองให้ปิดบอลวาล์ว (หมายเลข 12) ในส่วนไล่อากาศ เปิดบอลวาล์วบริเวณหน้าปั๊ม (หมายเลข 11) และบอลวาล์วบริเวณหลังชุดทดลอง (หมายเลข 6) เพื่อให้ น้ำจากถังเก็บน้ำไหลเข้าสู่ปั๊ม จากนั้นจึงเปิดปั๊มที่ควบคุมการทำงานด้วยอินเวอร์เตอร์ แล้วจึงปรับค่าความเร็วการไหลให้เป็นไปตามเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดไว้ ซึ่งอ้างอิงจากค่าความเร็วที่วัดได้จากเครื่องมือวัดการไหลที่บริเวณท่อตรงก่อนส่วนทดลองที่มีความยาวของระยะอัดสตริมและระยะดาวน์สตริมของการติดตั้ง

เครื่องมือวัดเป็นไปตามข้อกำหนดของ FCI [25] ค่าที่วัดได้จึงเป็นค่าที่ถูกต้อง โดยปั๊ม (หมายเลข 1) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชุดทดลองเป็นแบบหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำหน้าที่หมุนเวียนน้ำในชุดทดลองจากถังเก็บน้ำ ผ่าน วาล์วทางเดียว (หมายเลข 2) ไปสู่ออเฮดเดอร์ (Header) (หมายเลข 3) จากนั้น น้ำจะไหลเข้าสู่ส่วน ทดลองผ่านไปยังโกลบวาล์ว (หมายเลข 6) วาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหล (หมายเลข 7) และเข้าสู่ถัง เก็บน้ำ (หมายเลข 10) ตามลำดับ โดยก่อนการวัดความเร็วในทุกการทดลอง น้ำที่ไหลในระบบต้องมี ลักษณะเต็มท่อและอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady Flow) ด้วยเหตุนี้ เมื่อปั๊มทำงานแล้ว จึงต้องปล่อยให้ น้ำในระบบหมุนเวียนจนกว่าจะอยู่ในสภาวะคงตัวเป็นเวลาประมาณ 30 ถึง 45 นาที และสามารถ ตรวจสอบการไหลเต็มท่อของน้ำได้จากท่อใสที่ติดตั้งอยู่ระหว่างออเฮดเดอร์และส่วนทดลอง หากน้ำ ยังไม่เต็มท่อหรือมีฟองอากาศอยู่ ต้องไล่อากาศในส่วนทดลองให้ไหลไปยังท่อส่วนใส่อากาศ โดยการ เปิดบอลวาล์ว (หมายเลข 12) บริเวณส่วนใส่อากาศพร้อมกับปิดโกลบวาล์ว (หมายเลข 6)

### 3.1.3 การควบคุมความเร็วการไหลของน้ำ

สำหรับความเร็วการไหลของน้ำที่ 1 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร และความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ใช้ วิธีการจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส เข้าสู่ปั๊มโดยตรง ให้ปั๊มทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ ไม่สามารถควบคุมการทำงานที่ความเร็วการไหลสูง ๆ ได้ โดยความเร็วการไหลที่ต่ำลงมา ปั๊มในชุด ทดลองควบคุมผ่านอินเวอร์เตอร์ด้วยการปรับความถี่ โดยการเพิ่มความถี่จะส่งผลให้ใบพัดของปั๊ม หมุนเร็วมากขึ้น ซึ่งทำให้การไหลของน้ำมีความเร็วสูงขึ้น ซึ่งต้องปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้ได้ ความเร็วของการไหลในท่อที่ความเร็วต่าง ๆ ดังนี้

- ความเร็วการไหล 0.2 และ 0.5 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร
- ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร

### 3.1.4 การหาค่าปรับแก้โดยเฉลี่ยการทำงานของวาล์วเปลี่ยนทิศทาง

วาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ระยะเวลาในการเปลี่ยนทิศทาง 5 ถึง 7 วินาที (คู่มือการใช้งาน) จึงจำเป็นต้องปรับแก้มวลน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นจากการทำงานของวาล์ว โดยค่า ปรับแก้โดยเฉลี่ยที่ได้นี้เปลี่ยนตามความเร็วการไหลของน้ำและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง โดยทำการทดลองจนครบ 3 ครั้งต่อ 1 รอบการทดลอง และทำการทดลอง ทั้งหมด 3 รอบ ซึ่งค่าปรับแก้โดยเฉลี่ยการทำงานของวาล์วเปลี่ยนทิศทางที่ความเร็วการไหลและ ขนาดท่อต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าปรับแก้โดยเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการทำงานของวาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหลที่ขนาดท่อและความเร็วต่าง ๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เซนติเมตร)	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)	ค่าปรับแก้โดยเฉลี่ย (กรัม)
2.54	0.2	811±12
	0.5	1,106±6
	1.0	2,537±14
5.08	0.2	2,171±14
	0.5	4,770±22

### 3.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การทำนายการไหลในการทดลองนี้ใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 ซึ่งเป็นการทำนายการไหลของของไหลแบบ 3 มิติ อาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) โดยการทำนายเลือกจำลองเฉพาะของไหลเท่านั้น ไม่มีการจำลองในส่วนผนัง เนื่องจากความขรุขระของผนังท่อในการจำลองการไหลมีผลต่อลักษณะการไหลน้อยมาก [21] โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้ คือ Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$  ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ ANSYS แนะนำให้ใช้กับการไหลในท่อ และมีความแม่นยำมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ 2 ตัวแปรที่ใช้สมการ Reynolds-averaged navier-stokes ในการทำนาย

การทำนายการไหลในแต่ละแบบนี้ ใช้พารามิเตอร์และโครงสร้างตาข่ายที่มีรายละเอียดแตกต่างกัน โดยการทดลองการไหลภายในท่อของงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดการสร้างโครงสร้างตาข่ายแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการสร้างโครงสร้างตาข่าย

หัวข้อ	รายละเอียด
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

หัวข้อ	รายละเอียด
Sizing	
Use Advance Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Inflation	
Use Automatic Inflation	Program Controlled
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.05
Maximum layers	10
Growth Rate	1
Inflation Algorithm	Post

การสร้างโครงสร้างตาข่ายแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ โครงสร้างตาข่ายโดยรวม (Sizing) และโครงสร้างตาข่ายบริเวณผิวท่อ (Inflation) โดยรายละเอียดของการสร้างโครงสร้างตาข่ายทั้ง 2 ส่วน มีดังนี้

1) การกำหนดรายละเอียดสำหรับการสร้างโครงสร้างตาข่ายโดยรวม

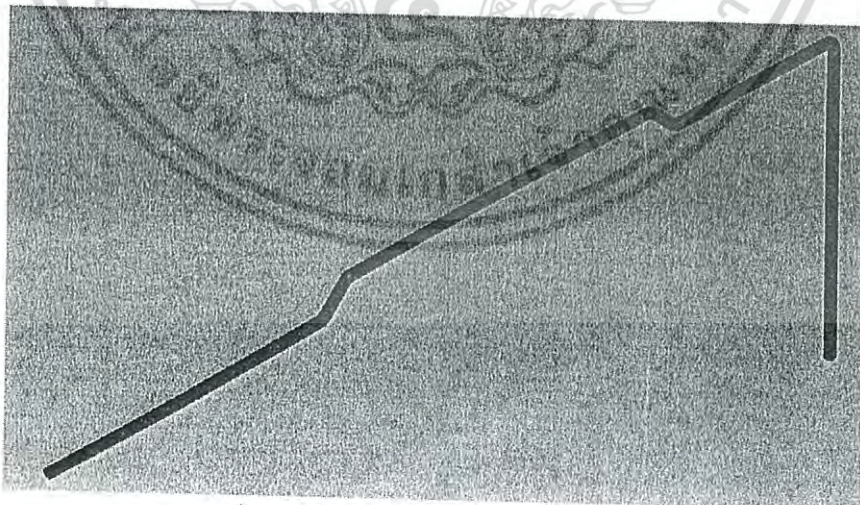
- สำหรับท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและท่อที่มีส่วนโค้ง ควรเลือกใช้ Use Advance Size Function แบบ Proximity and Curvature โดยในชุดทดลองของการวิจัยนี้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและท่อที่มีส่วนโค้งจากข้อต่อ 45 องศา

- หากต้องการให้โครงสร้างตาข่ายโดยรวมมีความละเอียดสูงควรเลือก Relevance Center

แบบ Fine เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

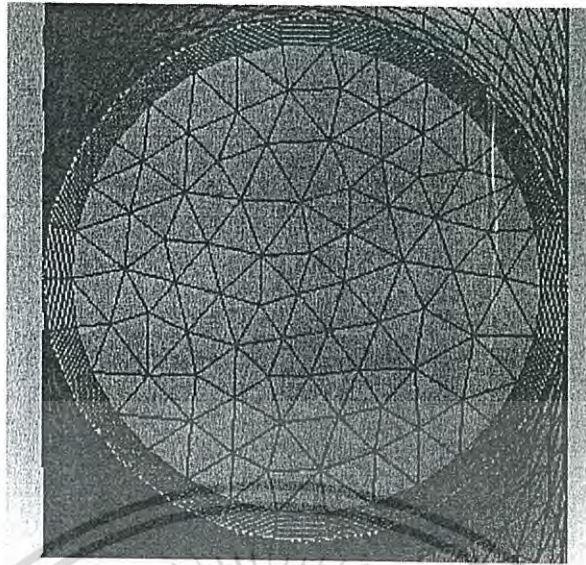
- เลือก Transition แบบ Slow เนื่องจากการไหลในชุดทดลองเป็นการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลแบบช้า
  - หากต้องการให้โครงสร้างตาข่ายบริเวณส่วนโค้งมีความละเอียดสูงควรเลือก Span Angle Center แบบ Fine
- 2) การกำหนดรายละเอียดสำหรับการสร้างโครงสร้างตาข่ายบริเวณผิวท่อ
- หากต้องการให้โครงสร้างตาข่ายบริเวณส่วนโค้งมีความละเอียดสูงควรเลือก Inflation Option แบบ Smooth Transition
  - หากต้องการให้ความหนาของโครงสร้างตาข่ายครอบคลุมบริเวณการไหลของน้ำบริเวณผิวท่อ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่มากควรเลือก Maximum layers เท่ากับ 10

โดยหากแบบจำลองใช้สำหรับการทำนายการไหลของน้ำในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ซึ่งมีความยาว 81.28 เซนติเมตร (32 นิ้ว) และ 165.1 เซนติเมตร (64 นิ้ว) ตามลำดับ ซึ่งแบ่งเป็นโครงสร้างตาข่าย (Mesh) จำนวน 2,824,272 และ 5,975,324 โครงสร้างตาข่าย สำหรับท่อขนาด 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยโครงสร้างตาข่ายบริเวณกลางท่อเป็นชนิด Tetrahedral ซึ่งเป็นโครงสร้างตาข่ายที่มีความแม่นยำในการทำนายสูง และโครงสร้างตาข่ายบริเวณผนังท่อเป็นชนิด Hexahedral ซึ่งเป็นโครงสร้างตาข่ายที่เหมาะสมกับบริเวณใกล้ผนังท่อ โครงสร้างตาข่ายสำหรับการทำนายการไหลภายในท่อแสดงดังรูปที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 ท่อจำลองจากโปรแกรม ANSYS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 โครงสร้างตาข่ายบริเวณหน้าตัดท่อ

พารามิเตอร์และตัวแปรขอบเขต (Boundary Conditions) ที่ป้อนในโปรแกรมสำหรับการจำลองการไหลแสดงดังตารางที่ 3.4 โดยรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์อธิบายในภาคผนวก ก และตัวแปรขอบเขตมีทั้งหมด 4 ตัวแปร ดังนี้

- Inlet water velocity เป็นค่าความเร็วที่ได้จากการวัดของเครื่องมือวัดการไหลที่ติดตั้งบริเวณก่อนส่วนทดลอง
- Outlet pressure เป็นค่าความดันที่อยู่บริเวณทางออกของท่อ โดยน้ำไหลออกจากท่อในชุดทดลองที่ความดันบรรยากาศ
- Density of pure water เป็นค่าความหนาแน่นของน้ำ โดยค่าความหนาแน่นที่ป้อนในโปรแกรมมีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิในการทดลองแต่ละการทดลอง
- Viscosity of pure water เป็นค่าความหนืดของน้ำ ซึ่งค่าความหนืดจลน์จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของน้ำในการทดลองแต่ละเงื่อนไขเช่นเดียวกับความหนาแน่น

และพารามิเตอร์ในส่วน Solution Methods เป็นค่าเริ่มต้นจาก ANSYS Fluent ที่แนะนำสำหรับการไหลในท่อ โดย Pressure กับ Momentum เลือกแบบ Second Order เพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างตาข่ายแบบ Tetrahedral ที่สร้างขึ้นมา ในส่วนของ Turbulent Kinetic Energy กับ Turbulent Dissipation Rate เลือกแบบ First Order Upwind เพื่อให้เกิดการลู่เข้าอย่างรวดเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาในการคำนวณต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ป้อนในโปรแกรม ANSYS Fluent

ตัวแปร	รายละเอียด
<b>Boundary Conditions</b>	
Inlet water velocity	ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร 0.2, 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร 0.2 และ 0.5 เมตรต่อวินาที
Outlet pressure	101.325 กิโลปาสกาล
<b>Solution Methods</b>	
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
<b>Calculation</b>	
Number of Iterations	1,000

โดยสามารถคำนวณความเร็วการไหลภายในท่อตามหลักการทำงานของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกโดยใช้สมการที่ 2.11 และคำนวณหาเวลาส่งผ่านตามสมการที่ 2.9 และ 2.10 ซึ่งค่าความเร็วที่คำนวณได้นี้ มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

- แบ่งเส้นทางที่คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเคลื่อนที่จากทรานสดิวเซอร์ตัวหนึ่งไปอีกตัวหนึ่งเป็น 10 ส่วนเท่า ๆ กัน
- นำค่าความเร็วเฉลี่ยการไหลและความยาวของเส้นทางในแต่ละส่วน มาคำนวณหาเวลาส่งผ่านตามสมการที่ 2.9 และ 2.10 และนำเวลาส่งผ่านในแต่ละส่วนมารวมกัน โดยจะได้เวลาส่งผ่านในทิศตามการไหล  $t_{AB}$  และทวนการไหล  $t_{BA}$
- นำเวลาส่งผ่าน  $t_{AB}$  และ  $t_{BA}$  มาคำนวณความเร็วการไหลที่มาจากหลักการวัดความเร็วของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกตามสมการที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การหาความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายที่เหมาะสม

การหาความละเอียดที่เหมาะสมของโครงสร้างตาข่ายใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST k- $\omega$  ในการทำนาย และมีตัวแปรขอบเขตเกี่ยวกับการทดลองหาค่าความเร็วอ้างอิงจากการซังน้ำหนักแบบสถิตย์ นั่นคือ ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที ความดันที่ทางออก 101.325 กิโลปาสกาล (ความดันบรรยากาศ) และใช้น้ำอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ซึ่งแบ่งและทดสอบโครงสร้างตาข่ายเป็น 4 ระดับ ดังนี้

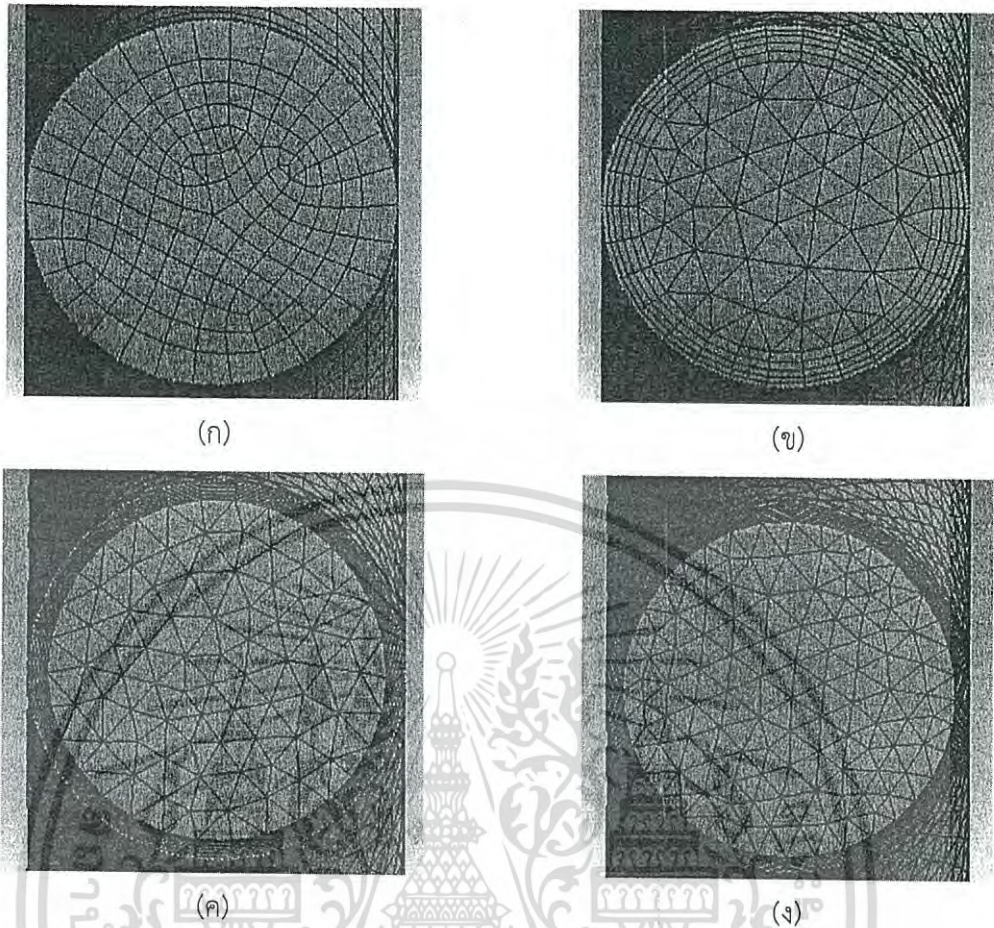
ระดับที่ 1 เป็นโครงสร้างแบบไร้ระเบียบ (Unstructured Mesh) โดยมีค่า Relevance เท่ากับ 100 และไม่มีโครงสร้างตาข่ายบริเวณผิวท่อ

ระดับที่ 2 เป็นโครงสร้างตาข่ายเป็นชนิด Tetrahedral บริเวณกลางท่อและโครงสร้างตาข่ายบริเวณผนังท่อเป็นชนิด Hexahedral ซึ่งเป็นโครงสร้างตาข่ายที่เหมาะสมกับบริเวณใกล้เคียงผนังท่อ โดยมี Inflation ที่ Maximum layer เท่ากับ 5

ระดับที่ 3 เป็นโครงสร้างตาข่ายชนิดเดียวกับระดับที่ 2 แต่มีความละเอียดบริเวณผิวท่อที่มากกว่า โดยมี Inflation ที่ Maximum layer เท่ากับ 10

ระดับที่ 4 เป็นโครงสร้างตาข่ายชนิดเดียวกับระดับที่ 3 โดยเพิ่มความละเอียดบริเวณกลางท่อให้มากขึ้น โดยมี Curvature Normal Angle เท่ากับ 10 องศา Num Cells Across Gap เท่ากับ 4 และ Growth Rate เท่ากับ 1.0

โครงสร้างตาข่ายที่ความละเอียดในแต่ละระดับแสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจากการสร้างโครงสร้างตาข่าย พบว่า โครงสร้างตาข่ายความละเอียดระดับที่ 1 (รูปที่ 3.6 ก) มีความละเอียดต่ำที่สุด เป็นโครงสร้างแบบไร้ระเบียบและไม่มีโครงสร้างตาข่ายในส่วนของผิวท่อ โครงสร้างตาข่ายความละเอียดระดับที่ 2 (รูปที่ 3.6 ข) เป็นโครงสร้างตาข่ายชนิด Tetrahedral บริเวณกลางท่อ และเพิ่มโครงสร้างตาข่ายชนิด Hexahedral ในบริเวณผิวท่อ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนาย โครงสร้างตาข่ายความละเอียดระดับที่ 3 (รูปที่ 3.6 ค) มีความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายบริเวณกลางท่อเท่ากับระดับที่ 2 แต่เพิ่มความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายบริเวณผิวท่อให้มากขึ้น และโครงสร้างตาข่ายความละเอียดระดับที่ 4 (รูปที่ 3.6 ง) เป็นโครงสร้างตาข่ายที่มีความละเอียดมากที่สุด โดยมีความละเอียดที่บริเวณผิวท่อมากกว่าทั้ง 3 ระดับก่อนหน้า แต่มีความละเอียดบริเวณผิวท่อเท่ากับระดับที่ 3



- รูปที่ 3.6 (ก) โครงสร้างตาข่ายแบบไร้ระเบียบมีความละเอียดระดับที่ 1  
 (ข) โครงสร้างตาข่ายชนิด Tetrahedral บริเวณกลางท่อและชนิด Hexahedral บริเวณผิว  
 ท่อความละเอียดระดับที่ 2  
 (ค) โครงสร้างตาข่ายชนิด Tetrahedral บริเวณกลางท่อและชนิด Hexahedral บริเวณผิว  
 ท่อความละเอียดระดับที่ 3  
 (ง) โครงสร้างตาข่ายชนิด Tetrahedral บริเวณกลางท่อและชนิด Hexahedral บริเวณผิว  
 ท่อความละเอียดระดับที่ 4

การเปรียบเทียบความเร็วจากการทำนายของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ระดับความละเอียดต่าง ๆ และความเร็วอ้างอิงแสดงดังตารางที่ 3.5 โดยความเร็วอ้างอิง เป็นความเร็วจากการซังน้ำหนักแบบสถิตย์ และความเร็วจากการทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นความเร็วตลอดหน้าตัดของท่อบริเวณทางออกของชุดทดลอง เพราะเป็นบริเวณเดียวกับที่น้ำในชุดทดลองไหลเข้าถึงวัดมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบความเร็วจากการทำนายของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและจากการซิงน้ำหนักแบบสถิตย์

ระดับของ ความละเอียด	จำนวนโครงสร้าง ตาข่าย	ระยะเวลาในการทำนาย (นาทีก)	ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)	
			การทำนาย <sup>1</sup>	อ้างอิง <sup>2</sup>
1	216,602	48	0.662	0.668
2	1,081,640	116	0.672	0.668
3	2,824,272	312	0.667	0.668
4	4,569,701	749	0.667	0.668

หมายเหตุ <sup>1</sup> ความเร็วจากการทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

<sup>2</sup> ความเร็วจากการซิงน้ำหนักแบบสถิตย์

พิจารณาความแตกต่างระหว่างความเร็วที่จากการทำนายและความเร็วอ้างอิงในตารางที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่า ความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายระดับที่ 1 และ 2 มีความแตกต่างเท่ากับ 0.898 และ 0.599 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ไม่พบความแตกต่างในความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายระดับที่ 3 และ 4 เนื่องจาก Round off error ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างค่าที่แสดงผลและค่าที่คำนวณได้ ซึ่งโครงสร้างระดับที่ 4 สามารถทำนายได้ใกล้เคียงค่าความจริงมากกว่า แต่สามารถแสดงผลได้แค่ทศนิยม 3 ตำแหน่ง ตามความละเอียดของเครื่องมือวัดการไหล จึงทำให้ไม่พบความแตกต่าง อย่างไรก็ตาม ความละเอียดระดับ 4 ใช้เวลาในการทำนายนานกว่าความละเอียดระดับที่ 3 ถึง 437 นาที โครงสร้างตาข่ายที่มีความละเอียดระดับ 3 จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายการไหลในชุดทดลองนี้

### 3.2.2 การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้มี 4 แบบจำลอง คือ แบบจำลองความปั่นป่วน STD k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$ , Realizable k- $\epsilon$ , และ SST k- $\omega$  โดยการจำลองจะใช้ตัวแปรขอบเขตเดียวกัน คือ ความเร็วที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ความดันที่ทางออก 101.325 กิโลปาสกาล (ความดันบรรยากาศ) และใช้น้ำอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เป็นตัวกลาง ซึ่งความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าตัดของท่อบริเวณทางออกเป็นบริเวณที่ใช้ในการเทียบกับความเร็วที่ได้จากการซิงน้ำหนักแบบสถิตย์ตามมาตรฐาน ISO 4185 โดยการทำการไหลใช้คอมพิวเตอร์ MSI GE60 (Intel Core i7-3630QM, DDRIII 8GB) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและจากการซิงน้ำหนักแบบสถิตย์ตามมาตรฐาน ISO 4185

แบบจำลองความปั่นป่วน	ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)		ความแตกต่าง (เปอร์เซ็นต์)
	การทำงาน <sup>1</sup>	อ้างอิง <sup>2</sup>	
STD k- $\epsilon$	0.667	0.668	0.150
RNG k- $\epsilon$	0.663	0.668	0.749
Realizable k- $\epsilon$	0.668	0.668	0
SST k- $\omega$	0.667	0.668	0.150

หมายเหตุ <sup>1</sup> ความเร็วจากการทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

<sup>2</sup> ความเร็วจากการซิงน้ำหนักแบบสถิตย์

จากการเปรียบเทียบความแตกต่าง แสดงให้เห็นว่า ความเร็วที่ได้จากแบบจำลอง RNG k- $\epsilon$  มีความคลาดเคลื่อนจากความเร็วจากการซิงน้ำหนักแบบสถิตย์มากที่สุด เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับการทำนายการไหลภายนอก (External flow) ส่วนแบบจำลอง STD k- $\epsilon$ , Realizable k- $\epsilon$  และ SST k- $\omega$  มีความแตกต่างน้อยลงมา โดย ANSYS แนะนำว่า แบบจำลอง SST k- $\omega$  เป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำที่สุดในบรรดาแบบจำลองเหล่านี้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ทำนายการไหลได้ดีทั้งบริเวณผิวท่อและบริเวณกลางท่อ จึงเลือกแบบจำลอง SST k- $\omega$  เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการไหลของน้ำภายในชุดทดลอง

### 3.3 วิธีการทดลอง

ก่อนทำการทดลองทุกครั้ง จำเป็นต้องตั้งค่าเริ่มต้น (Offset) โดยตั้งค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความหนาของผนังท่อ ชนิดของวัสดุบริเวณผิวท่อ (Lining material) ชนิดของวัสดุท่อ ชนิดของของไหลภายในท่อ เพื่อไม่ให้ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของการวัด โดยเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลมีลักษณะการติดตั้งทรานสดิวเซอร์เป็นแบบ V - method ซึ่งนิยมใช้กับท่อที่มีขนาดเล็ก และมีจำนวน Path เท่ากับ 1 Path

### 3.3.1 การทดสอบความถูกต้องและความเที่ยงตรงของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

เงื่อนไขการทดลองที่ใช้สำหรับการคำนวณความถูกต้อง (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ของเครื่องมือวัด คือ น้ำไหลภายในท่อส่วนทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ซึ่งมีข้อต่อ 45 องศาในทิศทางการไหลขึ้น ด้วยความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที โดยกำหนดการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ระยะอัดสตริม 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและระยะดาวนสตรีม 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ มีมุมในการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 75 องศา ซึ่งมาจากการแปลงค่าระยะระหว่างทรานสดิวเซอร์ที่เครื่องมือวัดกำหนด โดยการตั้งค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา และชนิดวัสดุของท่อ คุณสมบัติของผิวท่อ ชนิดของตะกอน และตัวกลางที่ใช้ งาน ซึ่งตลอดระยะเวลาของการทดลองใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (Fluke 52 II Thermometer) วัดอุณหภูมิของน้ำ เพื่ออ้างอิงถึงค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิใด ๆ โดยตารางความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในภาคผนวก ข โดยความหนาแน่นของน้ำใช้สำหรับการแปลงอัตราการไหลเชิงมวลไปเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร และแปลงเป็นความเร็วการไหลในท่อ

โดยในการทดลองนี้ เป็นการวัดความเร็วของน้ำด้วยเครื่องมือวัดแบบอัลตราโซนิกโดยใช้เครื่องบันทึกผลและเก็บข้อมูล (Data logger) ทุกวินาที เป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาเดียวกับการวัดความเร็วด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ จากนั้นปล่อยให้ น้ำไหลในระบบอย่างอิสระเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้มั่นใจว่าการไหลกลับมาสู่สภาวะคงตัวอย่างสมบูรณ์อีกครั้ง แล้วจึงทำการวัดครั้งที่สอง ทำการวัดที่ความเร็วนั้นจนครบ 3 ครั้ง ต่อ 1 รอบการทดลอง และทำการทดลองทั้งหมด 3 รอบ ซึ่งเริ่มจับเวลาทันทีที่การไหลของน้ำอยู่ในสภาวะคงตัว จากนั้นนำความเร็วที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมาเปรียบเทียบกับความเร็วที่ได้จากวิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าจริงหรือค่าความเร็วการไหลที่ถูกต้อง คำนวณหาความถูกต้องของการวัดโดยใช้สมการที่ 3.1 และ 3.2 และความเที่ยงตรงใช้สมการที่ 3.3 และ 3.4

$$\text{Error} = \left| \frac{X_{\text{mea}} - X_t}{X_t} \right| \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{Accuracy} = 100 - \text{Error} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

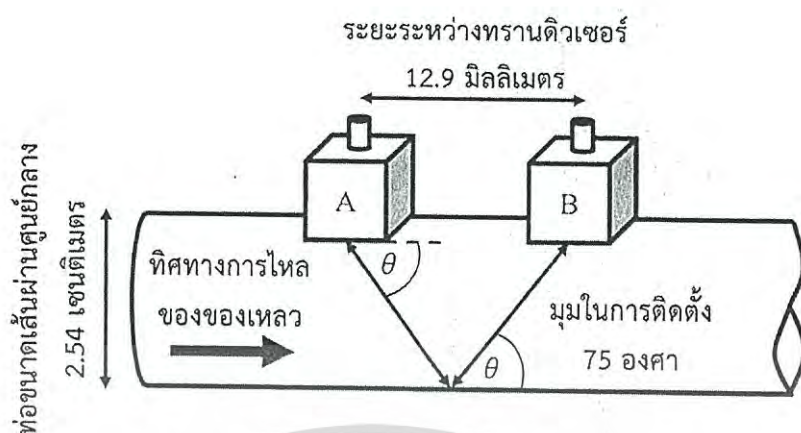
$$\text{Precision} = \left| \frac{X_i - X_m}{X_m} \right| \quad (3.3)$$

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.4)$$

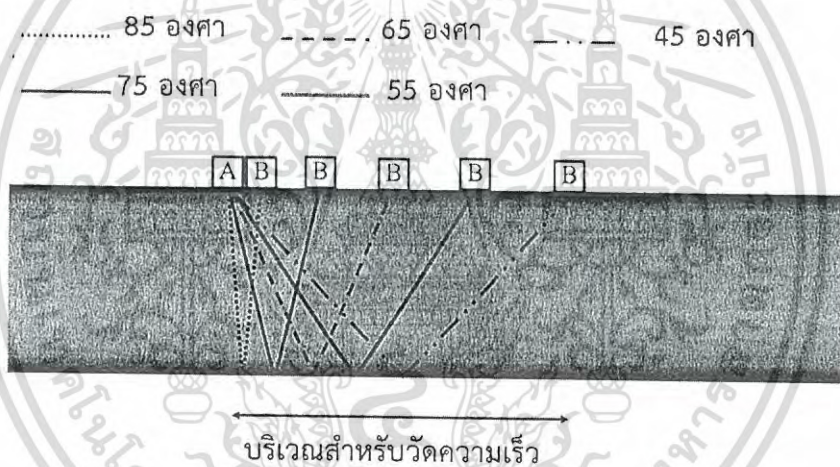
โดย	Error	คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์
	$X_{mea}$	คือ ค่าความเร็วที่วัดได้จากเครื่องมือวัด (เมตรต่อวินาที)
	$X_i$	คือ ค่าความเร็วจากการคำนวณโดยวิธีชั่งน้ำหนักแบบสถิติ (เมตรต่อวินาที)
	Accuracy	คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความแม่นยำ
	$X_m$	คือ ค่าเฉลี่ยของความเร็วที่วัดได้จากเครื่องมือวัด (เมตรต่อวินาที)
	$X_i$	คือ ค่าความเร็วที่วัดได้จากเครื่องมือวัดในแต่ละครั้ง (เมตรต่อวินาที)
	n	คือ จำนวนครั้งการวัด

### 3.3.2 มุมติดตั้งหรือระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์

การทดลองนี้กำหนดการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ระยะอัพสตรีมเท่ากับ 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและที่ระยะดาวน์สตรีมเท่ากับ 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ โดยเปลี่ยนมุมในการติดตั้งทีละ 5 องศา จากมุม 85 องศาจนถึง 45 องศา ซึ่งที่มุม 75 องศา มีระยะระหว่างทรานสดิวเซอร์ 12.9 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.7) สำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร และ 33.1 มิลลิเมตรสำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร วัดความเร็วของน้ำด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก โดยบันทึกค่าความเร็วด้วยเครื่องบันทึกผลและเก็บข้อมูลทุกวินาที เป็นระยะเวลา 10 วินาที โดยต้องเป็นช่วงเวลาเดียวกับการวัดความเร็วด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิติ จากนั้นปล่อยให้น้ำไหลในระบบอย่างอิสระเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้มั่นใจว่าการไหลกลับมาสู่สภาวะคงตัวอย่างสมบูรณ์อีกครั้ง แล้วจึงทำการวัดครั้งที่สอง ทำการวัดที่ความเร็วนั้นจนครบ 3 ครั้งต่อ 1 รอบการทดลอง และทำการทดลองทั้งหมด 3 รอบ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์ที่มุมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.8 และตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการติดตั้งทรานสดิวเซอร์โดยมีมุมเท่ากับ 75 องศา



รูปที่ 3.8 การวัดความเร็วของน้ำที่มุมในการติดตั้งต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ระยะระหว่างอพัสตรึมทรานสดิวเซอร์และดาวนส์ตรึมทรานสดิวเซอร์ที่มุมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่าง ๆ

มุมติดตั้ง (องศา)	ระยะระหว่างทรานสดิวเซอร์ (มิลลิเมตร)	
	ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
	2.54 เซนติเมตร	5.08 เซนติเมตร
85	4.4	10.5
80	9.0	21.2
75	12.9	33.1
70	18.5	43.0
65	23.7	55.3
60	29.3	69.3
55	35.6	84.0
50	42.6	100.7
45	50.8	120.0

### 3.3.3 ระยะอพัสตรึมและระยะดาวนส์ตรึม

การทดลองนี้กำหนดมุมในการติดตั้งเป็น 75 องศา ซึ่งเป็นมุมที่เครื่องมือวัดกำหนด ท่อที่ใช้มีความยาวคงที่ คือ ระยะอพัสตรึมยาว 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และระยะดาวนส์ตรึมยาว 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การเปลี่ยนระยะอพัสตรึมและระยะดาวนส์ตรึม โดยในการทดลอง ใช้เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกสำหรับวัดความเร็วของน้ำ บันทึกค่าความเร็วด้วยเครื่องบันทึกผลและเก็บข้อมูลทุกวินาที เป็นระยะเวลา 10 วินาที โดยต้องเป็นช่วงเวลาเดียวกับการวัดความเร็วด้วยวิธีการซั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ จากนั้นปล่อยให้น้ำไหลในระบบอย่างอิสระเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้มั่นใจว่าการไหลกลับมาสู่สภาวะคงตัวอย่างสมบูรณ์อีกครั้ง แล้วจึงทำการวัดครั้งที่สอง ทำการวัดที่ความเร็วนั้นจนครบ 3 ครั้งต่อ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 เงื่อนไขการทดลอง

ปัจจัยที่ปรับเปลี่ยน	เงื่อนไขการทดลอง
ระยะอัปสตรีม	20D, 18D, 16D, 14D, 12D, 10D, 8D, 6D, 4D และ 2D
ระยะดาว์นสตรีม	10D, 8D, 6D, 4D และ 2D

หมายเหตุ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

### 3.4 การวิเคราะห์ความถดถอย

การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression) เป็นการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปร เพื่อใช้ในการทำนายผลที่เกิดขึ้นจากทั้ง 2 ตัวแปร โดยในการทดลองนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะอัปสตรีมและระยะดาว์นสตรีม ( $X_1$ ) และตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลของน้ำภายในท่อ ( $X_2$ ) ที่มีคุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เพื่อหาความแตกต่างของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics และมีรูปแบบสมการคณิตศาสตร์สำหรับการทำนาย คือ สมการโพลิโนเมียล ดังแสดงในสมการที่ 3.4 [30]

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1X_2 + a_4X_1^2 + a_5X_2^2 + a_6X_1^2X_2 + a_7X_1X_2^2 + a_8X_1^2X_2^2 \quad (3.4)$$

ข้อมูลที่ใช้สำหรับการทำนายเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ความเร็วการไหล 0.5 และ 1 เมตรต่อวินาที แล้วใช้ข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วที่ไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที เป็นค่าสำหรับทวนสอบ โดยค่าความเร็วที่ 0.2 เมตรต่อวินาที ไม่นำมาใช้ เนื่องจากเป็นความเร็วที่ต่ำกว่าช่วงแนะนำในการใช้งาน

โดยในการวิเคราะห์ความถดถอยจำเป็นต้องวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (The coefficient of determination,  $R^2$ ) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความคล้ายคลึงของผลการทดลองและสมการคณิตศาสตร์ นอกจากนี้อีกค่าที่ต้องพิจารณา คือ ค่าการประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการถดถอย (Standard error of estimate; SEE) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแปรปรวนระหว่างตัวแปรตามจากการทดลอง (ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือการไหล) และตัวแปรตามจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ค่าที่ต้องพิจารณา คือ ค่าการประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการถดถอย (Standard error of estimate; SEE) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแปรปรวนระหว่างตัวแปรตามจากการทดลอง (ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือการไหล) และตัวแปรตามจากการทำนาย (ค่าความคลาดเคลื่อนจากการปรับแก้) โดยสมการสำหรับหาค่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ แสดงดังสมการที่ 3.5 และค่าการประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการถดถอย แสดงดังสมการที่ 3.6 ถึง 3.8 [30]

$$R^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.5)$$

$$b = \frac{\sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3.6)$$

$$a = \frac{\sum y - b \sum x}{N} \quad (3.7)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum y^2 - a \sum y - b \sum xy}{N-2}} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงความถูกต้องและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก เพื่อประเมินความพร้อมของเครื่องมือวัดสำหรับการนำมาใช้เพื่อวัดความเร็วในงานวิจัยนี้ การเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก ความเร็วที่ได้จากการทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และความเร็วที่ได้จากการคำนวณน้ำหนักด้วยวิธีการชั่งแบบสถิตย์ซึ่งกำหนดเป็นค่าความเร็วอ้างอิง เพื่อหาผลของระยะและมุมติดตั้งทรานสดิวเซอร์อัสตริ่มและควาน์สตริมที่มีต่อความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วด้วยเครื่องมือวัด และเพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับประมาณความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และการใช้สมการวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

#### 4.1 ความถูกต้องและความเที่ยงตรงของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

การทดสอบความถูกต้องและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดการไหล (Fuji Electric system co., Ltd. FSD220Y1) ที่ติดตั้งบริเวณท่อตรงโดยมีระยะอัสตริ่มและควาน์สตริมเป็น 20 เท่า และ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) ตามลำดับ และมีมุมในการติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 75 องศา โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วของน้ำอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ไหลอยู่ในท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับการวัดความเร็วด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ จากการทดลอง พบว่าเครื่องมือวัดการไหลนี้สามารถวัดความเร็วโดยเฉลี่ยของน้ำที่ไหลภายในท่อได้เท่ากับ 0.490 เมตรต่อวินาที ในขณะที่ ความเร็วจริงซึ่งวัดได้จากวิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์มีค่าเท่ากับ 0.498 เมตรต่อวินาที จากการคำนวณ พบว่า เครื่องมือวัดการไหลนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 1.632 เปอร์เซ็นต์ ค่าความถูกต้องเท่ากับ 98.368 เปอร์เซ็นต์ และความเที่ยงตรงเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นความเร็วกลาตเคลื่อนประมาณ 0.01 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าต่ำกว่า 0.03 ถึง 0.05 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ผู้ผลิตรับไว้ จึงสามารถสรุปได้ว่า เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกเครื่องนี้มีความเหมาะสมเพียงพอสำหรับการนำมาใช้เพื่อวัดความเร็วของน้ำที่ไหลในท่อในงานวิจัยนี้ได้

## 4.2 ผลของการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่มีต่อความถูกต้องของค่าความเร็วที่วัดได้

### 4.2.1 การติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลที่ระยะอัปสตรีมและระยะดาวน์สตรีมต่าง ๆ

เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่านเป็นเครื่องมือวัดที่อาศัยความแตกต่างของเวลาส่งผ่านในทิศทางและทวนการไหล โดยความถูกต้องของการวัดความเร็วขึ้นอยู่กับระยะในการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ ได้แก่ ระยะอัปสตรีมหรือระยะท่อดตรงปราศจากการรบกวนการไหลก่อนเครื่องมือวัด และระยะดาวน์สตรีมหรือระยะท่อดตรงปราศจากการรบกวนการไหลหลังเครื่องมือวัด และตามข้อกำหนดของ FCI แนะนำว่า ระยะอัปสตรีมและดาวน์สตรีมต้องไม่น้อยกว่า 20D และ 10D ตามลำดับ ซึ่งระยะติดตั้งดังกล่าวจะไม่มีผลกระทบหรือมีผลน้อยมากต่อความถูกต้องของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหล ทำให้ค่าความเร็วที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนต่ำ [3, 5] โดยความเร็วที่ได้จากการวัดจากเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ระยะติดตั้งต่าง ๆ ความเร็วอ้างอิงจากการซั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ และความเร็วจากการทำนายการไหลโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.5 และค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่ไหลภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกกับความเร็วที่คำนวณได้จากวิธีการซั่งน้ำหนักแบบสถิตย์แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร

ระยะการติดตั้ง	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)					
	0.2 เมตรต่อวินาที ในทิศทางการไหลขึ้น			0.2 เมตรต่อวินาที ในทิศทางการไหลลง		
	เครื่องมือวัด	ความเร็วอ้างอิง	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	เครื่องมือวัด	ความเร็วอ้างอิง	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ระยะอัปสตรีม						
20D	0.226±0.004	0.263±0.004	0.268	0.253±0.004	0.219±0.007	0.216
18D	0.225±0.002	0.263±0.003	0.267	0.240±0.003	0.232±0.005	0.216
16D	0.225±0.003	0.263±0.010	0.266	0.236±0.001	0.229±0.001	0.216
14D	0.223±0.004	0.265±0.007	0.266	0.236±0.003	0.219±0.004	0.216
12D	0.223±0.003	0.263±0.008	0.266	0.228±0.004	0.225±0.009	0.216
10D	0.219±0.002	0.267±0.004	0.265	0.215±0.002	0.213±0.002	0.215
8D	0.212±0.006	0.259±0.008	0.265	0.215±0.001	0.217±0.004	0.215
6D	0.210±0.001	0.256±0.006	0.265	0.212±0.001	0.219±0.008	0.214
ระยะดาวน์สตรีม						
8D	0.228±0.002	0.255±0.006	0.269	0.256±0.002	0.223±0.004	0.216
6D	0.228±0.002	0.261±0.006	0.269	0.257±0.004	0.222±0.006	0.216
4D	0.223±0.004	0.274±0.009	0.265	0.253±0.004	0.214±0.011	0.216

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร

ระยะการติดตั้ง	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)					
	0.5 เมตรต่อวินาที ในทิศทางการไหลขึ้น			0.5 เมตรต่อวินาที ในทิศทางการไหลลง		
	เครื่องมือวัด	ความเร็วอ้างอิง	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	เครื่องมือวัด	ความเร็วอ้างอิง	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ระยะอัปสตรีม						
20D	0.493±0.009	0.483±0.001	0.492	0.507±0.012	0.501±0.003	0.510
18D	0.485±0.014	0.488±0.002	0.492	0.509±0.012	0.497±0.005	0.509
16D	0.489±0.012	0.481±0.005	0.492	0.493±0.011	0.493±0.004	0.509
14D	0.474±0.014	0.493±0.007	0.491	0.487±0.010	0.493±0.009	0.509
12D	0.464±0.019	0.496±0.011	0.491	0.490±0.014	0.451±0.006	0.509
10D	0.461±0.001	0.497±0.003	0.491	0.471±0.011	0.499±0.005	0.508
8D	0.442±0.001	0.491±0.008	0.491	0.463±0.012	0.501±0.009	0.508
6D	0.422±0.013	0.489±0.009	0.490	0.444±0.013	0.504±0.010	0.508
ระยะดาวน์สตรีม						
8D	0.516±0.013	0.488±0.004	0.492	0.515±0.012	0.483±0.007	0.510
6D	0.539±0.012	0.490±0.001	0.492	0.521±0.011	0.483±0.008	0.510
4D	0.530±0.011	0.487±0.013	0.492	0.513±0.012	0.486±0.005	0.509

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 1.0 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร

ระยะการติดตั้ง	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)					
	1.0 เมตรต่อวินาที ในทิศทางการไหลขึ้น			1.0 เมตรต่อวินาที ในทิศทางการไหลลง		
	เครื่องมือวัด	ความเร็ว อ้างอิง	พลศาสตร์ ของไหล เชิงคำนวณ	เครื่องมือวัด	ความเร็ว อ้างอิง	พลศาสตร์ ของไหล เชิงคำนวณ
ระยะอัปสตรีม						
20D	0.929±0.012	0.966±0.003	0.968	0.991±0.013	0.962±0.013	0.967
18D	0.923±0.009	0.970±0.001	0.966	0.988±0.011	0.933±0.012	0.967
16D	0.923±0.010	0.987±0.005	0.965	0.977±0.011	0.917±0.009	0.968
14D	0.918±0.009	0.981±0.007	0.963	0.971±0.010	0.903±0.013	0.968
12D	0.904±0.013	0.985±0.008	0.962	0.968±0.013	0.894±0.007	0.968
10D	0.839±0.009	0.974±0.014	0.962	0.968±0.014	0.887±0.004	0.967
8D	0.813±0.011	0.951±0.009	0.962	0.956±0.012	0.852±0.009	0.965
6D	0.810±0.011	0.956±0.015	0.961	0.947±0.013	0.844±0.010	0.962
ระยะดาวน์สตรีม						
8D	0.928±0.013	0.974±0.012	0.970	0.995±0.010	0.940±0.005	0.967
6D	0.929±0.015	0.989±0.008	0.972	0.997±0.013	0.936±0.013	0.967
4D	0.927±0.010	0.981±0.007	0.972	0.965±0.011	0.901±0.008	0.968

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร

ระยะการติดตั้ง	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)					
	0.2 เมตรต่อวินาที ในทิศทางการไหลขึ้น			0.2 เมตรต่อวินาที ในทิศทางการไหลลง		
	เครื่องมือวัด	ความเร็วอ้างอิง	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	เครื่องมือวัด	ความเร็วอ้างอิง	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ระยะอัปสตรีม						
20D	0.183±0.006	0.208±0.000	0.203	0.220±0.013	0.217±0.016	0.218
18D	0.191±0.006	0.209±0.011	0.203	0.218±0.015	0.217±0.013	0.218
16D	0.183±0.005	0.209±0.009	0.202	0.213±0.013	0.217±0.012	0.218
14D	0.182±0.014	0.207±0.013	0.202	0.216±0.009	0.216±0.004	0.217
12D	0.182±0.011	0.206±0.006	0.202	0.200±0.012	0.209±0.013	0.217
10D	0.182±0.008	0.208±0.003	0.202	0.195±0.014	0.218±0.010	0.217
8D	0.182±0.010	0.208±0.005	0.202	0.193±0.015	0.219±0.009	0.216
6D	0.179±0.014	0.207±0.009	0.201	0.192±0.005	0.215±0.008	0.216
4D	0.173±0.012	0.206±0.010	0.201	0.191±0.012	0.210±0.005	0.215
2D	0.173±0.011	0.208±0.011	0.201	0.191±0.011	0.218±0.014	0.214
ระยะดาวน์สตรีม						
8D	0.183±0.006	0.208±0.010	0.203	0.222±0.014	0.216±0.011	0.218
6D	0.183±0.008	0.205±0.009	0.204	0.234±0.012	0.210±0.009	0.219
4D	0.179±0.018	0.206±0.008	0.205	0.235±0.010	0.209±0.016	0.219
2D	0.176±0.014	0.205±0.014	0.205	0.227±0.011	0.207±0.013	0.219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร

ระยะการติดตั้ง	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)					
	0.5 เมตรต่อวินาที ในทิศทางการไหลขึ้น			0.5 เมตรต่อวินาที ในทิศทางการไหลลง		
	เครื่องมือวัด	ความเร็วอ้างอิง	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	เครื่องมือวัด	ความเร็วอ้างอิง	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ระยะอัฟสตรีม						
20D	0.499±0.010	0.497±0.011	0.497	0.498±0.011	0.498±0.011	0.506
18D	0.484±0.014	0.481±0.018	0.497	0.493±0.017	0.481±0.009	0.506
16D	0.482±0.013	0.486±0.016	0.497	0.488±0.013	0.482±0.017	0.505
14D	0.474±0.011	0.487±0.008	0.497	0.481±0.011	0.481±0.012	0.505
12D	0.473±0.018	0.473±0.05	0.495	0.482±0.015	0.484±0.012	0.505
10D	0.474±0.006	0.485±0.006	0.495	0.476±0.011	0.484±0.010	0.504
8D	0.462±0.013	0.477±0.015	0.494	0.468±0.017	0.482±0.001	0.504
6D	0.451±0.022	0.485±0.011	0.494	0.466±0.011	0.481±0.008	0.503
4D	0.421±0.014	0.479±0.013	0.494	0.451±0.011	0.479±0.013	0.503
2D	0.420±0.014	0.482±0.007	0.493	0.432±0.012	0.476±0.021	0.503
ระยะดาวน์สตรีม						
8D	0.518±0.011	0.487±0.008	0.498	0.505±0.012	0.478±0.014	0.506
6D	0.521±0.019	0.484±0.019	0.498	0.506±0.021	0.480±0.008	0.507
4D	0.529±0.021	0.485±0.021	0.498	0.513±0.019	0.479±0.016	0.508
2D	0.519±0.018	0.484±0.016	0.499	0.513±0.017	0.484±0.010	0.508

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ (เซนติเมตร)	ความเร็ว (เมตรต่อ วินาที)	ทิศทาง การไหล	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย <sup>1</sup> (เปอร์เซ็นต์)														
			ระยะอัปสตรีม <sup>2</sup>										ระยะดาว์นสตรีม <sup>3</sup>				
			2D	4D	6D	8D	10D	12D	14D	16D	18D	20D <sup>4</sup>	10D <sup>4</sup>	8D	6D	4D	2D
2.54	0.2	ขึ้น <sup>5</sup>	- <sup>7</sup>	-	18.1	18.0	17.9	15.3	15.7	14.6	14.8	13.1	13.1	14.7	15.5	18.6	-
		ลง <sup>6</sup>	-	-	20.2	18.2	18.2	15.2	15.2	14.6	14.2	13.6	13.6	20.3	21.0	22.7	-
	0.5	ขึ้น	-	-	16.7	16.1	15.2	12.5	10.3	9.5	7.5	6.2	6.2	10.2	11.9	17.1	-
		ลง	-	-	16.0	13.6	12.6	11.0	10.2	9.6	8.5	7.8	7.8	10.8	12.8	15.5	-
	1.0	ขึ้น	-	-	15.3	14.5	13.8	8.2	6.4	6.5	4.8	3.9	3.9	8.7	10.1	15.5	-
		ลง	-	-	12.3	12.2	9.1	8.2	7.5	6.6	5.9	3.0	3.0	8.9	10.6	17.1	-
5.08	0.2	ขึ้น	16.9	16.0	13.4	12.5	12.7	8.7	8.0	4.7	2.5	2.0	2.0	11.9	11.5	12.9	14.1
		ลง	12.4	8.9	8.4	8.1	7.9	4.1	3.1	2.1	2.0	1.4	1.4	10.2	11.7	12.3	19.5
	0.5	ขึ้น	13.0	12.1	6.9	3.2	2.4	1.6	1.9	0.8	0.4	0.4	0.4	6.3	7.7	9.0	17.3
		ลง	9.3	5.9	3.2	2.9	1.6	1.3	1.1	0.7	0.6	0.3	0.3	5.7	7.3	9.1	16.0

หมายเหตุ <sup>1</sup> ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ <sup>2</sup> ติดตั้งที่ระยะดาว์นสตรีมถูกต้อง (10D) <sup>3</sup> ติดตั้งที่ระยะอัปสตรีมถูกต้อง (20D) <sup>4</sup> ระยะการติดตั้งอ้างอิง

<sup>5</sup> ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางการไหลขึ้น

<sup>6</sup> ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางการไหลลง

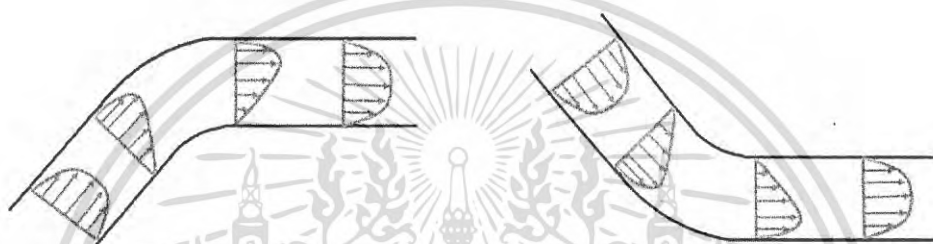
<sup>7</sup> "-" คือ ไม่สามารถวัดความเร็วได้

พิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 4.6 พบว่า การติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ระยะอัปสตรีม 20D และระยะดาวน์สตรีม 10D เป็นตำแหน่งติดตั้งที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด เนื่องจากระยะติดตั้งเป็นไปตามข้อกำหนดของ FCI ซึ่งลักษณะแนวเส้นความเร็วที่บริเวณติดตั้งดังกล่าวเป็นลักษณะไหลเต็มท่อแบบปั่นป่วน (Turbulent Fully Developed) ซึ่งเป็นแนวเส้นความเร็วที่ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ โดยแนวเส้นความเร็วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านตัวรบกวน ซึ่งในการทดลองนี้คือ ข้อต่อ 45 องศา โดยการไหลของน้ำผ่านข้อต่อ 45 องศา ในทิศทางการไหลขึ้นและลง ส่งผลให้แนวเส้นความเร็วเปลี่ยนแปลงไป โดยมีตำแหน่งของความเร็วสูงสุดอยู่บริเวณใกล้ผิวท่อด้านบนหรือด้านล่างตามทิศทางของข้อต่อ (รูปที่ 4.1) เนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งเครื่องมือวัดการไหลแบบ อัลตราโซนิกใช้ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดต่อสำหรับวัดความเร็ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จึงไม่ควรมีความแตกต่างกัน แต่จากผลการทดลองกลับพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนจากการไหลของน้ำผ่านข้อต่อ 45 องศา ในทิศทางการไหลลงต่ำกว่าการไหลในทิศทางการไหลขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากความเร็วจานการไหลในท่อที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การไหลของน้ำผ่านข้อต่อ 45 องศาในทิศทางการไหลขึ้นต้องเอาชนะแรงต้านจากทั้งแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับผิวท่อ จึงทำให้น้ำบางส่วนเกิดการไหลย้อนกลับ ส่งผลให้การไหลผ่านข้อต่อ 45 องศา [14] ในทิศทางการไหลขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า ดังแสดงในรูป 4.2

เมื่อพิจารณาขนาดท่อและความเร็วการไหลภายในท่อ พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร (ตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 27,000) มีค่าน้อยกว่าการวัดการไหลที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร (ตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 13,000) ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนมีสาเหตุมาจากคุณลักษณะการไหลของน้ำ โดยการไหลในท่อขนาดใหญ่นั้นเป็นการไหลแบบปั่นป่วนที่มีตัวเลขเรย์โนลด์สูง (รูปที่ 4.3 (ก)) จึงมีขนาดแนวเส้นความเร็ว (Velocity profile) บริเวณกลางท่อที่ใกล้เคียงกันมากกว่าการไหลแบบปั่นป่วนในท่อขนาดเล็กซึ่งมีตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ (รูปที่ 4.3 (ข)) ที่ความเร็วการไหลเดียวกัน จากเหตุผลดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่า ความเร็วในแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดท่อขนาดใหญ่มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ความคลาดเคลื่อนจากการวัดมีค่าน้อยกว่าการไหลในท่อขนาดเล็ก ซึ่งความแตกต่างอยู่ในช่วง 5-7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกันกับการศึกษาวิจัยที่พบว่า การไหลที่มีตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 10,000 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ [4] นอกจากนี้ อีกหนึ่งตัวแปรที่ส่งผลให้ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น คือ ความเร็วการไหล โดยความเร็วการไหลที่มากขึ้น ตัวเลขเรย์โนลด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้แนวเส้นความเร็วมีลักษณะดังรูปที่ 4.3 (ก) ด้วยสาเหตุดังกล่าว การเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหลจึงทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของขนาดท่อ ซึ่งผลการทดลองนี้ตรงกับข้อสรุปของ Baker [3]

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ พบว่า หากระยะในการติดตั้งต่ำกว่าตำแหน่งที่แนะนำ ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากแนวเส้นความเร็วเกิด

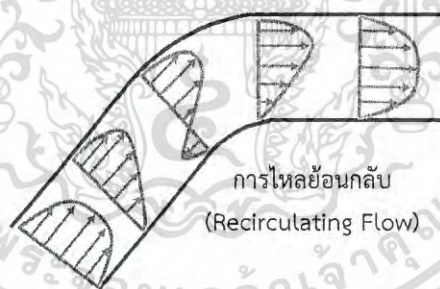
การเปลี่ยนแปลงจากการไหลผ่านตัวรบกวน ส่งผลให้แนวเส้นความเร็วไม่อยู่ในลักษณะไหลเต็มท่อแบบปั่นป่วน โดยการไหลผ่านข้อต่อ 45 องศา ส่งผลให้แนวเส้นการไหลเปลี่ยนไปดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแนวเส้นการไหลส่งผลให้ที่ระยะในการติดตั้งใกล้กับตัวรบกวนทั้งระยะอัดสตรึม 2D ถึง 8D หรือ ระยะดาว์นสตรึม 2D ถึง 4D มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง จึงไม่แนะนำให้ติดตั้งเครื่องมือวัดและใช้ค่าสำหรับชดเชยในบริเวณนี้ เช่นเดียวกับความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาที ที่เป็นความเร็วต่ำกว่าย่านการวัดของเครื่องมือวัดรุ่นนี้ โดยสำหรับท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร ที่ระยะอัดสตรึม 2D ถึง 4D และ ระยะดาว์นสตรึม 2D ไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากข้อจำกัดของชุดทดลองและเครื่องมือวัดการไหล



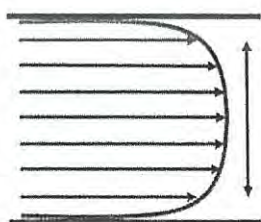
ก) ข้อต่อ 45 องศา ทิศทางการไหลขึ้น

ข) ข้อต่อ 45 องศา ทิศทางการไหลลง

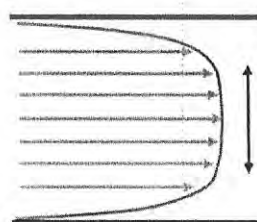
รูปที่ 4.1 แนวเส้นการไหลหลังผ่านข้อต่อ 45 องศา



รูปที่ 4.2 การไหลย้อนกลับในข้อต่อ 45 องศา ในทิศทางการไหลขึ้น



ก) เลขเรย์โนลด์สูง



ข) เลขเรย์โนลด์ต่ำ

รูปที่ 4.3 แนวเส้นการไหลแบบปั่นป่วนที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดที่ระยะอัปสตรีม 2D ถึง 8D หรือ ระยะดาวน์สตรีม 2D ถึง 4D นั้นมีความแตกต่างกันตามความเร็วและขนาดท่อ โดยการไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความเร็วการไหล 1 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเดียวกัน มีค่าความคลาดเคลื่อนลดลงเหลือประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับขนาดท่อที่ใหญ่ขึ้นก็ให้ผลในทิศทางเดียวกันกับความเร็วที่เพิ่มขึ้น โดยการไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแนวโน้มของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลงตามข้อสรุปของ Baker [3] และ Carlander and delsing [9] จะเห็นได้ว่าระยะอัปสตรีม 2D ถึง 8D หรือ ระยะดาวน์สตรีม 2D ถึง 4D สามารถทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้มากถึง 17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนจะลดลงเมื่อระยะในการติดตั้งมีมากกว่าระยะดังกล่าว

ในขณะที่การไหลของน้ำในท่อที่มีระยะอัปสตรีมยาว 10D ถึง 20D และระยะดาวน์สตรีมยาว 8D ถึง 6D ซึ่งเป็นระยะที่แนวเส้นการไหลมีลักษณะใกล้เคียงกับแนวเส้นการไหลลักษณะเต็มท่อแบบปั่นป่วน ค่าความคลาดเคลื่อนจึงมีค่าต่ำลง โดยที่การไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 6 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มขนาดท่อเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ที่ความเร็วเดียวกัน ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงเหลือประมาณ 2 ถึง 12 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับการเพิ่มความเร็วการไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร เป็นความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงเหลือ 3 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ผลการทดลอง ยังสามารถสรุปได้ว่า ระยะดาวน์สตรีมเป็นสิ่งที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนมากกว่าระยะอัปสตรีมที่ระยะเปลี่ยนแปลงเท่ากัน โดยที่ระยะอัปสตรีมและดาวน์สตรีมลดลงไป 2D ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการลดลงของระยะอัปสตรีมอยู่ที่ประมาณ 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ ตามความเร็วและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการลดลงของระยะดาวน์สตรีมอยู่ที่ประมาณ 5 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์

#### 4.2.2 การติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่มีขนาดต่าง ๆ

มุมที่ใช้ในการทดลองมี 9 มุม คือ 85, 80, 75, 70, 65, 60, 55, 50 และ 45 องศา โดยมุมที่แนะนำสำหรับการติดตั้ง คือ 75 องศา โดยท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 12.9 มิลลิเมตร และ 33.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่ไหลภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกเปรียบเทียบกับความเร็วที่คำนวณได้จากวิธีการซังน้ำหนักแบบสถิตย์ที่มีมุมติดตั้งต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลที่มุมติดตั้งต่าง ๆ

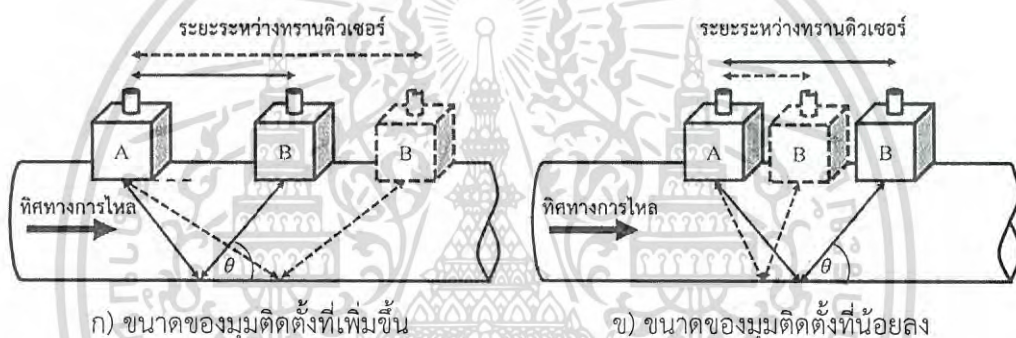
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เซนติเมตร)	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)	ทิศทางการไหล	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่มุมติดตั้งต่าง ๆ <sup>1</sup> (เปอร์เซ็นต์)								
			85 องศา	80 องศา	75 องศา <sup>2</sup>	70 องศา	65 องศา	60 องศา	55 องศา	50 องศา	45 องศา
			ขึ้น <sup>3</sup>	ลง <sup>4</sup>	ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง	ขึ้น
2.54	0.2	ขึ้น <sup>3</sup>	10.7	4.8	2.5	3.6	4.9	5.8	9.0	10.2	16.2
		ลง <sup>4</sup>	11.4	5.4	3.3	3.5	5.2	6.7	9.5	11.3	17.3
	0.5	ขึ้น	3.6	2.5	0.4	1.7	3.1	3.4	6.7	8.5	14.1
		ลง	4.2	2.5	0.6	1.5	2.6	3.2	6.3	9.0	15.0
	1.0	ขึ้น	3.6	1.4	0.8	1.1	1.4	3.1	5.6	7.8	9.2
		ลง	3.8	1.0	0.4	0.8	1.5	2.3	6.2	8.1	10.4
5.08	0.2	ขึ้น	5.6	2.1	1.8	2.0	3.4	- <sup>5</sup>	-	-	-
		ลง	6.7	2.9	1.3	2.5	2.6	-	-	-	-
	0.5	ขึ้น	3.2	1.3	0.5	1.6	2.3	-	-	-	-
		ลง	3.3	1.6	0.4	1.2	1.8	-	-	-	-

หมายเหตุ <sup>1</sup> ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ <sup>2</sup> มุมติดตั้งอ้างอิง (75 องศา) <sup>3</sup> ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางการไหลขึ้น <sup>4</sup> ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางการไหลลง

<sup>5</sup> “-” คือ ไม่สามารถวัดความเร็วได้

จากการพิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 4.7 พบว่า ที่มุม 75 องศา เป็นมุมที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุดในทุกการทดลอง เนื่องจากเป็นมุมที่ผู้ผลิตแนะนำสำหรับการติดตั้ง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดมีค่าแตกต่างกันตามความเร็วการไหลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ โดยการไหลของน้ำผ่านข้อต่อ 45 องศา ทั้งในทิศทางการไหลขึ้นและลงไม่มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนจากมุมติดตั้ง เนื่องจากการทดลองนี้ติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ระยะอัดสตรึม 20D และระยะดาวน์สตรึม 10D

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนมุมติดตั้ง พบว่า ขนาดของมุมติดตั้งที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะระหว่างทรานสดิวเซอร์ลดลง ค่าความเร็วที่อ่านได้มีค่ามากกว่าความเร็วอ้างอิงที่ได้จากวิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ ในทางตรงกันข้าม หากขนาดของมุมติดตั้งน้อยลง ระยะระหว่างทรานสดิวเซอร์จะมีค่ามากขึ้น ความเร็วที่อ่านได้จึงมีค่าน้อยกว่าความเร็วอ้างอิง (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.4 ขนาดของมุมติดตั้งที่เปลี่ยนแปลง

นอกจากนี้ อีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน คือ การสูญเสียจากการแพร่กระจาย (Spreading loss) [24] ซึ่งคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะเกิดการสูญเสียพลังงานให้กับตัวกลางนั้น ๆ ค่าแอมพลิจูดของคลื่นเสียงจึงมีค่าต่ำลง และหากระยะระหว่างทรานสดิวเซอร์มีมากขึ้น การสูญเสียย่อมมีมากขึ้นตามไปด้วย โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การวัดความเร็วที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ที่มุม 55, 50 และ 45 องศา มีความคลาดเคลื่อนมาก และการวัดความเร็วที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ที่มุม 60, 55, 50 และ 45 องศา ไม่สามารถวัดความเร็วได้ เนื่องจากเกิดการสูญเสียดังกล่าว ค่าแอมพลิจูดของคลื่นเสียงจึงมีค่าน้อยเกินกว่าที่ทรานสดิวเซอร์จะรับได้ เครื่องมือวัดการไหลจึงไม่สามารถแสดงค่าความเร็วได้ ในขณะที่มุม 85 และ 80 องศา เป็นมุมที่มีระยะระหว่างทรานสดิวเซอร์น้อย จึงไม่เกิดการสูญเสียจากการ

แพร่กระจาย แต่เนื่องจาก ความแตกต่างระหว่างเวลาส่งผ่านในทิวทัศน์และตามการไหลมีน้อย จึงเกิดความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็ว [24]

#### 4.3 การประมาณความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่ไหลภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ซึ่งได้จากการจำลองการไหลด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST  $k-\omega$  และคำนวณความเร็วการไหลภายในท่อตามหลักการทำงานของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาผ่าน (โดยใช้สมการที่ 2.9 ถึง 2.11 ดังแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ค) เปรียบเทียบกับความเร็วที่ได้จากวิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ที่มุมและระยะติดตั้งทรานสดิวเซอร์ในตำแหน่งต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการทำนายความเร็วโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มุมติดตั้งต่าง ๆ

ขนาดเส้น ผ่าน ศูนย์กลางท่อ (เซนติเมตร)	ความเร็ว (เมตรต่อ วินาที)	ทิศทาง การไหล	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่มุมติดตั้งต่าง ๆ <sup>1</sup> (เปอร์เซ็นต์)								
			85 องศา	80 องศา	75 องศา <sup>2</sup>	70 องศา	65 องศา	60 องศา	55 องศา	50 องศา	45 องศา
			2.54	0.2	ขึ้น <sup>3</sup>	1.8	1.3	0.6	1.2	1.8	1.9
		ลง <sup>4</sup>	1.8	1.5	0.4	0.8	2.1	1.9	2.6	2.9	3.8
	0.5	ขึ้น	1.8	0.9	0.2	0.9	1.1	1.5	2.1	2.4	2.7
		ลง	1.7	1.0	0.4	0.8	1.0	1.2	1.8	2.8	2.8
	1.0	ขึ้น	1.4	0.9	0.0	1.2	1.6	1.7	2.2	2.4	2.7
		ลง	1.2	0.7	0.0	1.4	1.4	1.5	1.8	2.0	2.7
	0.2	ขึ้น	1.6	0.7	0.0	0.6	0.8	- <sup>5</sup>	-	-	-
		ลง	1.7	0.3	0.5	0.7	1.1	-	-	-	-
5.08	0.5	ขึ้น	1.5	0.5	0.0	0.6	0.9	-	-	-	-
		ลง	1.3	0.4	0.3	0.2	0.7	-	-	-	-

หมายเหตุ <sup>1</sup> ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ <sup>2</sup> มุมติดตั้งอ้างอิง (75 องศา) <sup>3</sup> ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางการไหลขึ้น <sup>4</sup> ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางการไหลลง

<sup>5</sup> “-” คือ ไม่สามารถวัดความเร็วได้

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการทำนายความเร็วโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เซนติเมตร)	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)	ทิศทางการไหล	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย <sup>1</sup> (เปอร์เซ็นต์)														
			ระยะอัปสตรีม <sup>2</sup>									ระยะดาวน์สตรีม <sup>3</sup>					
			2D	4D	6D	8D	10D	12D	14D	16D	18D	20D <sup>4</sup>	10D	8D	6D	4D	2D
2.54	0.2	ขึ้น <sup>5</sup>	-7	-	5.6	5.3	4.1	3.1	2.5	2.3	1.8	1.9	1.9	4.2	5.1	5.9	-
		ลง <sup>6</sup>	-	-	5.7	5.3	4.8	3.0	2.8	2.4	2.1	1.9	1.9	4.8	5.5	5.7	-
	0.5	ขึ้น	-	-	3.2	3.0	2.7	2.9	2.2	1.9	1.6	0.3	0.3	4.1	4.3	5.0	-
		ลง	-	-	5.6	3.5	3.2	3.1	2.5	2.3	1.8	0.6	0.6	3.5	3.5	4.9	-
	1.0	ขึ้น	-	-	3.5	2.1	2.2	2.3	1.8	1.2	0.4	0.2	0.2	2.4	3.7	4.3	-
		ลง	-	-	4.0	3.2	4.0	3.2	2.2	2.5	1.6	0.9	0.9	2.9	3.4	3.8	-
5.08	0.2	ขึ้น	7.2	5.1	4.9	3.5	4.0	2.7	2.0	2.2	1.9	1.4	1.4	3.2	4.9	5.6	5.1
		ลง	7.7	5.0	4.5	3.5	3.1	2.4	2.8	1.8	1.3	0.6	0.6	3.9	4.5	5.0	6.0
	0.5	ขึ้น	3.6	3.6	3.0	2.9	2.7	2.6	2.5	1.3	1.2	0.7	0.7	2.3	3.4	5.4	5.7
		ลง	3.9	3.6	3.6	3.0	2.5	1.7	1.5	1.4	1.2	0.7	0.7	3.1	4.5	4.7	5.1

หมายเหตุ <sup>1</sup> ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ <sup>2</sup> ติดตั้งที่ระยะดาวน์สตรีมถูกต้อง (10D) <sup>3</sup> ติดตั้งที่ระยะอัปสตรีมถูกต้อง (20D) <sup>4</sup> ระยะการติดตั้งอ้างอิง

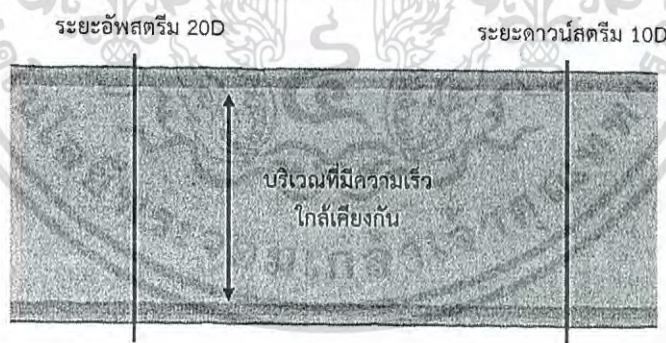
<sup>5</sup> ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางการไหลขึ้น

<sup>6</sup> ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางการไหลลง

<sup>7</sup> "-" คือ ไม่สามารถวัดความเร็วได้

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นผลมาจากการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่มุมและระยะการติดตั้งต่าง ๆ ให้ผลในทิศทางเดียวกับผลการทดลองในตารางที่ 4.6 และ 4.7 เนื่องจากการประมาณความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณใช้หลักการเดียวกับเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน แต่ค่าความคลาดเคลื่อนยังมีความแตกต่างกัน เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ไม่ได้มีสาเหตุมาจากการไหลเพียงอย่างเดียว แต่อาจมีสาเหตุอื่นที่แตกต่างกันไป เช่น ความเร็วการไหลขนาดท่อ ระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์ รวมถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เป็นต้น จากการที่ความคลาดเคลื่อนเกิดได้จากหลายสาเหตุ ทำให้การประมาณค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมุมติดตั้งจึงทำได้ยาก เนื่องจากการสูญเสียจากการแพร่กระจายของคลื่นเสียงเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนจากมุมติดตั้ง จึงไม่แนะนำให้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากมุมติดตั้ง

ในขณะที่การประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากระยะในการติดตั้งสามารถทำได้ง่ายกว่า เนื่องจากสาเหตุของค่าความคลาดเคลื่อนมาจากแนวเส้นความเร็วที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการไหลของน้ำภายในท่อ โดยที่ระยะอัดสตริม 20D และระยะดาวน์สตริม 10D เป็นตำแหน่งที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด เช่นเดียวกับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการวัดความเร็วด้วยเครื่องมือวัดในชุดทดลอง เนื่องจากบริเวณกลางท่อมีความเร็วที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างภาพคอนทัวร์การไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที

แม้ว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากมุมติดตั้งและระยะในการติดตั้งได้ในแนวโน้มเดียวกับเครื่องมือวัดการไหล แต่ค่าความคลาดเคลื่อนนั้นก็ยังมี ความแตกต่างกันอยู่ โดยเกิดจากหลายสาเหตุดังนี้

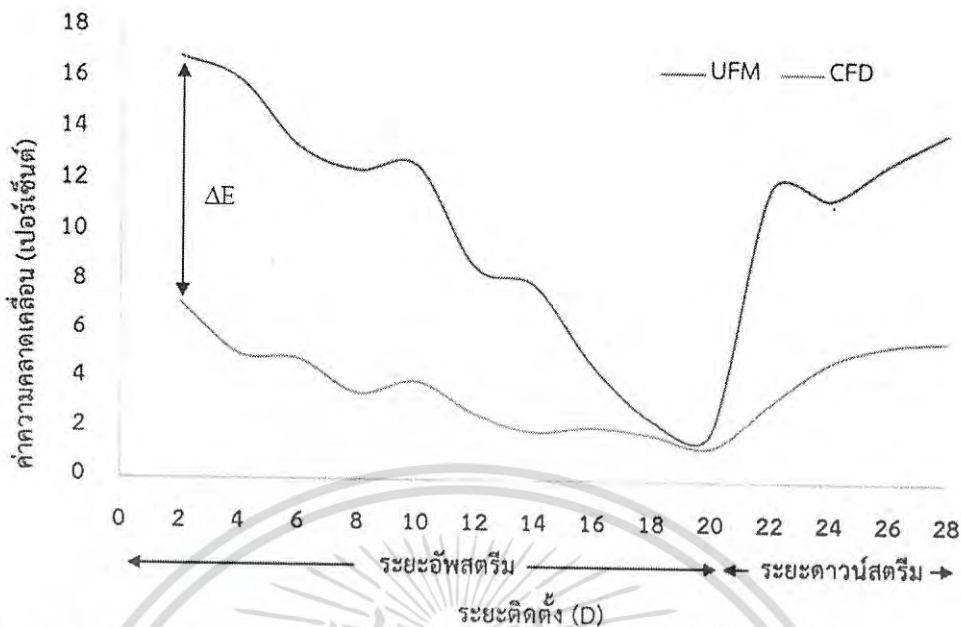
- พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเพียงเครื่องมือที่บอกแนวโน้มการไหลของของไหลเท่านั้น และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเหมาะสำหรับการไหลเต็มท่อแบบปั่นป่วนเท่านั้น แต่การไหลจริงนั้นเป็นการไหลที่มีหลายรูปแบบในหน้าตัดเดียว [23]

- เงื่อนไขขอบเขตในการทำนายต้องกำหนดให้เป็นค่าคงที่เพื่อให้ง่ายต่อการทำนาย โดยเงื่อนไขขอบเขตที่ต้องกำหนดเป็นค่าเฉลี่ยมี 2 ตัวแปร คือ ความเร็วขาเข้า และความหนาแน่นของน้ำ โดยความเร็วที่ป้อนเข้าไปเป็นความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการวัดความเร็วบริเวณก่อนส่วนทดลอง แต่ความเร็วการไหลของน้ำจากปั๊มมีค่าแตกต่างกันไปตามความเร็วรอบใบพัดของปั๊ม ซึ่งความแตกต่างนี้ส่งผลให้ความเร็วจากการทำนายและความเร็วจากการซิงก์น้ำหนักจึงแตกต่างกันไปตามแต่ละช่วงเวลาของการทดลอง และเช่นเดียวกับความหนาแน่นของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยในการทดลองจริง อุณหภูมิ น้ำ ณ เวลาเริ่มต้นและหลังการทดลอง แตกต่างกันประมาณ 3 ถึง 5 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของน้ำแตกต่างกันไปในแต่ละช่วงเวลาเช่นกัน แต่ความหนาแน่นในการทำนายเป็นความหนาแน่นจากอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดลอง จึงทำให้ค่าที่ได้จากการทำนายคลาดเคลื่อน

- การทำนายจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการทดลองนี้ เป็นการทำนายแต่เพียงในส่วน ของไหลเท่านั้น ไม่รวมถึงความหนาท่อ หรือปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อความถูกต้องของการวัดความเร็ว โดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก เช่น ความเต็มท่อ ปริมาณฟองอากาศ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของน้ำระหว่างการวัด การติดตั้งของทรานสดิวเซอร์ และการสูญเสียจากการแพร่กระจาย เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน และจากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้การทำนายความเร็วจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงมีค่าต่ำกว่าความคลาดเคลื่อนจริงที่เกิดขึ้น

จากการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแสดงให้เห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจากการทำนายและจากเครื่องมือวัดการไหลมีค่าแตกต่างกัน โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณประมาณค่าความคลาดเคลื่อนได้ต่ำกว่าความเป็นจริง โดยความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันนั้นอาจเกิดขึ้นจากตัวเครื่องมือวัดการไหลเอง ซึ่งพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณไม่สามารถประมาณความคลาดเคลื่อนในส่วนนี้ได้ จึงต้องอาศัยการทำนายจากผลการทดลองด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอย โดยทำนายจากความแตกต่างระหว่างความคลาดเคลื่อนพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและจากเครื่องมือวัดในชุดทดลอง ( $\Delta E$ ) ด้วยข้อมูลการทดลองจากการไหลของน้ำภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร และใช้ผลการทดลองที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตรเป็นตัวหวนสอบ โดยความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจากการทำนายและจากเครื่องมือวัดการไหลแสดงดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจากการทำนายและจากเครื่องมือวัดการไหลที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาที

สำหรับการทำนายนี้ใช้การวิเคราะห์ความถดถอยในรูปแบบของสมการโพลิโนเมียล ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใกล้เคียงมากที่สุดกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและจากเครื่องมือวัดการไหล โดยประกอบด้วย 2 ตัวแปร คือ ระยะอัสตริม ( $U_s$ ) กับระยะดาวนัสตริม ( $D_s$ ) และตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ที่มีคุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ดังแสดงในสมการที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งเป็นสมการสำหรับระยะอัสตริมที่ความเร็วช่วง 0.2 ถึง 1.0 เมตรต่อวินาที และสมการสำหรับระยะดาวนัสตริมที่ความเร็ว 0.2 ถึง 1.0 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

$$\Delta E = 10.114 + 0.726U_s - 1.52 \times 10^{-4}U_s Re + 4.275 \times 10^{-9}U_s Re^2 \tag{4.1}$$

$$R^2 = 0.746 \text{ และ } SEE = 2.131$$

$$\Delta E = -16.629 - 1.56 \times 10^{-4}U_s Re - 4.682 \times 10^{-10}D_s^2 Re^2 \tag{4.2}$$

$$R^2 = 0.760 \text{ และ } SEE = 2.167$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมการที่ 4.1 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.746 และการประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการถดถอย เท่ากับ 2.131 และสมการที่ 4.2 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.760 และการประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการถดถอยเท่ากับ 2.167 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณต้องปรับแก้ด้วยค่าชดเชยซึ่งได้จากการวิเคราะห์ความถดถอย เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่องมือการไหลมากที่สุด ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการหาความคลาดเคลื่อนได้ดังนี้

- ประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์และตัวแปรขอบเขตให้ใกล้เคียงกับการทดลองในชุดทดลองทั้งหมด เช่น ค่าความเร็วการไหลขาเข้า ค่าความดันขาออก ชนิดและคุณสมบัติของไหล เป็นต้น

- หาค่าชดเชยของความคลาดเคลื่อน ( $\Delta E$ ) จากระยะอัปสตรีม (สมการที่ 4.1) และระยะดาวน์สตรีม (สมการที่ 4.2) โดยการแทนค่าระยะอัปสตรีม ( $U_s$ ) กับระยะดาวน์สตรีม ( $D_s$ ) และตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ )

- นำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการประมาณมาปรับแก้เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดการไหล

โดยการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ผ่านการชดเชยแล้วกับค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากเครื่องมือวัดการไหลของท่อขนาด 5.08 เซนติเมตร ความเร็ว 0.2 และ 0.5 เมตรต่อวินาที แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนหลังการปรับแก้แล้วกับค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากเครื่องมือวัดการไหลของท่อขนาด 5.08 เซนติเมตร ความเร็ว 0.2 และ 0.5 เมตรต่อวินาที

ระยะการติดตั้ง	ความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)					
	ความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที			ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที		
	CFD และการปรับแก้	เครื่องมือวัดการไหล <sup>1</sup>	ความแตกต่าง	CFD และการปรับแก้	เครื่องมือวัดการไหล	ความแตกต่าง
ระยะอัปสตรีม <sup>2</sup>						
12D	8.1	8.7	0.6	5.1	1.6	3.5
14D	7.2	8	0.8	3.8	1.9	1.9
16D	6.2	4.7	1.5	2.3	0.8	1.5
18D	5.1	2.5	2.6	0.8	0.4	0.4
20D <sup>4</sup>	3.8	2	1.8	0.5	0.4	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

ระยะ การ ติดตั้ง	ความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)					
	ความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที			ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที		
	CFD และ การปรับแก้	เครื่องมือวัด การไหล <sup>1</sup>	ความ แตกต่าง	CFD และ การปรับแก้	เครื่องมือ วัดการไหล	ความ แตกต่าง
ระยะดาวนสตรีม <sup>3</sup>						
10D <sup>4</sup>	3.8	2	1.8	0.5	0.4	0.1
8D	8.9	11.9	3.0	6.9	6.3	0.6
6D	11.0	11.5	0.5	7.2	7.7	0.5

หมายเหตุ <sup>1</sup> ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ <sup>2</sup> ติดตั้งที่ระยะดาวนสตรีมถูกต้อง (10D)  
<sup>3</sup> ติดตั้งที่ระยะอพัสตรีมถูกต้อง (20D) <sup>4</sup> ระยะการติดตั้งอ้างอิง

จากค่าความคลาดเคลื่อนในตารางที่ 4.10 พบว่า ที่ระยะอพัสตรีม 12D ถึง 20D และระยะดาวนสตรีม 6D ถึง 8D ซึ่งเป็นระยะติดตั้งที่แนะนำสำหรับใช้สมการชดเชยมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ผ่านการชดเชยแล้วกับค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากเครื่องมือวัดการไหลมีความแตกต่างกัน 0.1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ผ่านการชดเชยแล้วมีค่าใกล้เคียงกับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดกับเครื่องมือวัดการไหล โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ผ่านการชดเชยสามารถนำไปใช้ได้กับท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือความเร็วที่แตกต่างจากการทดลองได้ แต่ในการทำนายค่าความคลาดเคลื่อนต้องอาศัยค่าชดเชยจากการวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดการไหลมากขึ้น ซึ่งขอบเขตของการประมาณความคลาดเคลื่อนนี้ คือ สามารถใช้ได้ดีในช่วง ตัวเลขเรย์โนลด์ 10,000 ถึง 25,000 เท่านั้น เนื่องจากเป็นช่วงเดียวกับการทดลอง หากใช้ค่าชดเชยในการปรับแก้นอกช่วงดังกล่าว ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จะมีความแตกต่างจากค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดมาก โดยจากค่าความคลาดเคลื่อนที่ผ่านการชดเชยแล้ว แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการติดตั้งของเครื่องมือวัดการไหลโดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้ชุดทดลองสำหรับการจำลองการไหลจริง ๆ

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การติดตั้งทรานสดิวเซอร์รับส่งสัญญาณของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่านให้ถูกต้อง เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่วัดได้ โดยแบ่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ออกได้เป็น 2 ประเภท คือ มุมและตำแหน่งในการติดตั้ง (ระยะอัปสตรีมและระยะดาวน์สตรีม) วิชานิพนธ์นี้นำเสนอผลของการติดตั้งที่มีต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดความเร็วด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน โดยทำการจำลองการไหลของน้ำผ่านชุดทดลองที่ประกอบด้วยข้อต่อ 45 องศา ในทิศทางขึ้นและลง ในช่วงความเร็วการไหลเท่ากับ 0.2, 0.5 และ 1 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร รวมถึงนำเสนอการประมาณความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้น โดยใช้แบบจำลองการไหลด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและคำนวณความเร็วการไหลภายในท่อตามหลักการการทำงานของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาผ่าน จากการทดลองพบว่า

- ที่ระยะอัปสตรีมและดาวน์สตรีม 20 และ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เป็นตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำสุด โดยที่ความเร็วการไหล ขนาดท่อ และทิศทางของข้อต่อ 45 องศา ต่างให้แนวโน้มความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะอัปสตรีมและดาวน์สตรีมต่ำกว่าข้อกำหนดของ FCI เนื่องจากแนวเส้นความเร็วเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อไหลผ่านหรือเข้าใกล้ตัวรบกวน (เช่น ข้อต่อ 45 องศา)
- สำหรับมุมติดตั้งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อน ซึ่งมุมติดตั้งที่มีขนาดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีระยะระหว่างทรานสดิวเซอร์น้อย ความแตกต่างของเวลาส่งผ่านในทิศทางและทวนการไหลจึงมีน้อย ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็ว ในทางกลับกัน หากมุมติดตั้งมีขนาดน้อยลง ระยะระหว่างทรานสดิวเซอร์จะมีค่ามาก อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียจากการแพร่กระจาย ซึ่งทำให้แอมพลิจูดของคลื่นเสียงลดลง เครื่องมือวัดการไหลจึงไม่สามารถวัดความเร็วการไหลได้หรืออ่านค่าได้คลาดเคลื่อน
- หากมีข้อจำกัดด้านการติดตั้งในส่วนของมุม ควรติดตั้งที่มุมติดตั้งห่างจากมุมที่ผู้ผลิตแนะนำไม่เกิน 10 องศา ซึ่งสามารถเกิดค่าความคลาดเคลื่อนได้ประมาณ 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์
- ระยะอัปสตรีมและดาวน์สตรีมควรติดตั้งไม่ต่ำกว่า 14D และ 8D ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งในการติดตั้งดังกล่าว ส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อน ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การติดตั้งที่มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด คือ ระยะเวลาตัวนำสตรึม ระยะเวลาอัปสตรึม และมุมติดตั้ง ตามลำดับ

สำหรับการประมาณความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้น โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST k- $\omega$  ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และคำนวณความเร็วการไหลภายในท่อตามหลักการทำงานของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาผ่าน พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ประมาณได้มีแนวโน้มเดียวกับความคลาดเคลื่อนที่ได้จากเครื่องมือวัด โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ประมาณได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งสามารถปรับแก้ได้โดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอยในรูปแบบของสมการโพลีโนเมียล สำหรับการประเมินค่าปรับแก้ (oE) โดยมีตัวแปร คือ ระยะเวลาอัปสตรึม ( $U_s$ ) กับระยะตัวนำสตรึม ( $D_s$ ) และตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) โดยสมการโพลีโนเมียล

- สมการการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในระยะอัปสตรึมแสดงในสมการที่ 4.1 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0.746 และการประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการถดถอย เท่ากับ 2.131
- สมการการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในระยะตัวนำสตรึมแสดงในสมการที่ 4.2 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.760 และการประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการถดถอยเท่ากับ 2.167
- สมการการปรับแก้สามารถนำมาใช้เพื่อทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดด้วยเครื่องมือวัดที่ตำแหน่งติดตั้งต่าง ๆ ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ 10,000 ถึง 25,000 เนื่องจากเป็นช่วงเดียวกับการทดลอง หากใช้ค่าชดเชยในการปรับแก้ในช่วงดังกล่าว ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จะมีความแตกต่างจากค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดมาก

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของการติดตั้งที่มีต่อความถูกต้องของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหล เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับอ้างอิงถึงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากข้อจำกัดในการติดตั้ง ทั้งในส่วนของระยะอัปสตรึม ระยะตัวนำสตรึม หรือ มุมติดตั้ง เนื่องจากในการใช้งานจริง ตัวรบกวนไม่ได้มีเพียงข้อต่อ 45 องศา เท่านั้น แต่ยังมีข้อต่อ 90 องศา ข้อตัวรูปตัวที ข้อลด หรือ วาล์วชนิดอื่น ๆ ซึ่งตัวรบกวนแต่ละแบบต่างส่งผลต่อแนวเส้นการไหลที่แตกต่างกัน ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดจึงมีค่าแตกต่างกันไป ดังนั้น ในการวิจัยต่อไปจึงควรศึกษาถึงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งตัวรบกวนที่มีผลต่อการวัดความเร็วของเครื่องมือวัดการไหล โดยเน้นความหลากหลายของตัวรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ใช้หลักการเดียวกับเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิคชนิดเวลาส่งผ่าน โดยมีการแบ่งท่อออกเป็นหลายส่วนเท่า ๆ กัน ซึ่งในการทดลองแบ่งท่อออกเป็น 10 ส่วนเท่า ๆ กันตามแนวระดับ แต่จากการศึกษาพบว่า ที่บริเวณผิวท่อเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วสูง จึงควรแบ่งบริเวณผิวท่อให้มีความละเอียดมากขึ้น เพื่อให้ได้ค่าเวลาส่งผ่านที่ต้องถูกต้องมากขึ้น และอีกหนึ่งสิ่งที่ควรพัฒนา คือ สมการสำหรับการชดเชยค่าความแตกต่างของค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลและความเร็วจากการทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งควรมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงกว่านี้ เพื่อให้สามารถชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนได้ใกล้เคียงยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Metropolitan waterworks authority. 2015. Annual report 2015 th. [Online]. Available : [http://www.mwa.co.th/download/pln0201/annual2015/annual\\_report\\_2015\\_th.pdf](http://www.mwa.co.th/download/pln0201/annual2015/annual_report_2015_th.pdf)
- [2] Lynnworth, L.C., Liu, Y. 2006. "Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005". *Ultrasonic*. 44 : e1371-e1378
- [3] Baker, R. C. 2000. *Flow Measurement Handbook*. New York : Cambridge university Press
- [4] Svensson, B. Delsing, J. 1998. "Application of ultrasonic clamp-on flow meters for in situ tests of billing meters in district heating systems". *Flow Measurement and Instrumentation*. 9 : 33-41
- [5] Ruppel, C. Peters, F. 2004. "Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter". *Flow Measurement and Instrumentation*. 15 : 167-177
- [6] Wang, C. Meng, T. Hu, H.M. Zhang, L. 2012. "Accuracy of the ultrasonic flow meter used in the hydroturbine intake penstock of the Three Gorges Power Station". *Flow Measurement and Instrumentation*. 25 : 32-39
- [7] Cairney, W.D. 1991. "Typical flow measurement problems and their solution in the electricity supply industry". *J. Flow Meas. Instrum.* 2 : 217-24
- [8] Holm, M. Stang, J. Delsing, J. 1995. "Simulation of flow meter calibration factors for various Installation effects". *Measurement*. 15 : 235-244
- [9] Carlander, C. Delsing, J. 1998. "Installation effects on an ultrasonic flow meter". *FLOMEKO'98*. : 150-154
- [10] Berrebi, J. Martinson, P.-E. Willatzen, M. Delsing, J. 2004. "Ultrasonic flow metering errors due to pulsating flow". *Flow Measurement and Instrumentation*. 15: 179-185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Ishikawa, H. Takamoto, M. Shimizu, K. Mongi, H. Matsui, G. 2002. "Sensor Configuration and Flow Rate Characteristics of Ultrasonic Flowmeter for Very Low Liquid Flow Rate". *Trans. of the society of instrument and Control Engineers*. E2 (1) : 160-164
- [12] Steven, R. 2008. "A dimensional analysis of two phase flow through a horizontally installed Venturi flow meter". *Flow Measurement and Instrumentation*. 19 : 342-349
- [13] Chen, W. Xu, Y. Yuan, C. Wu, Haitao Zhang, Tao 2016. "An investigation of wet gas over-reading in orifice plates under ultra-low liquid fraction conditions using dimensional analysis". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 32 : 390-394
- [14] Davidson, L. 2015. *Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling*. [Online]. Available : [www.tfd.chalmers.se/~lada/MoF/lecture\\_notes.html](http://www.tfd.chalmers.se/~lada/MoF/lecture_notes.html)
- [15] Temperley, N.C. Behnia, M. Collings, A.F. 2004. "Application of computational fluid dynamics and laser Doppler velocimetry to liquid ultrasonic flow meter design". *Flow Measurement and Instrumentation*. 15 : 155-165
- [16] Sonin, A.A. 2001. *The Physical Basic of Dimensional Analysis*. 2<sup>nd</sup> edition. Cambridge : Department of Mechanical Engineering MIT
- [17] Post, S. 2011. *Applied and Computational Fluid Mechanics*. Boston : Jones and Bartlett Publishers.
- [18] Kumar, P. Bing, M.W.M. 2011. "A CFD study of low pressure wet gas metering using slotted orifice meters". *Flow Measurement and Instrumentation*. 22 : 33-42
- [19] Shah, M. Joshi, J.B. Kalsi, A.S. Prasad, C.S.R. Shukla, D.S. 2012. "Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation". *Chemical Engineering Science*. 71 : 300-309
- [20] Hilgenstock, A. Ernst, R. 1996. "Analysis of installation effect by mean of computational fluid dynamic (CFD) vs. experiment?". *Flow Meas. Instrum.* 7 : 161-171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] Lee, W.K. Barton, N.A. 2008. ASSESSMENT OF CFD TECHNIQUES FOR PREDICTING ULTRASONIC FLOWMETER ERRORS IN LNG APPLICATIONS. [Online]. Available : [http://www.tuvnel.com/\\_x90lbm/2008\\_5.pdf](http://www.tuvnel.com/_x90lbm/2008_5.pdf)
- [22] Martins, N.M.C. Soares, A.K. Ramos, H.M. Covas, D.I.C. 2016 “CFD modeling of transient flow in pressurized pipes”. *Computers and Fluids*. 126 : 129-140
- [23] Asteriadou, K. Hasting, A.P.M. Bird, M.R. Melrose, J. 2006 “COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS FOR THE PREDICTION OF TEMPERATURE PROFILES AND HYGIENIC DESIGN IN THE FOOD INDUSTRY”. *Institution of Chemical Engineers*. 84(C2) : 157-163
- [24] International Standard ISO 6416. 2004. Hydrometry - Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method.
- [25] Fluid Components International. 2007. Best Practices Engineering Guide. [Online]. Available : <http://www.fluidcomponents.com/assets/media/ManualsGuides/General/Best-Practices-Engineering-Guide-RevB.pdf>
- [26] สืบสกุล คุรุรัตน์ เอกชัย จันทสาโร และวราภรณ์ จันทสาโร. 2548. “การประเมินแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k- $\omega$  SST สำหรับการไหลแบบ Wall Bounded Flows ภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส 3 มิติ.” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. 19 :
- [27] Temperley, N. C. Behnia, M. Colling, A.F. 2000. “Flow patterns in an ultrasonic liquid flow meter”. *Flow Measurement and Instrumentation*. 11 : 11-18
- [28] Wang, B. Jin, X. Huang, R. Chen, S. 2014. “Simulation and experimental verification of a fuel calibration system based on metering cylinder” . *Flow Measurement and Instrumentation*. 38 : 131-138
- [29] International Standard ISO 4185. 1980. Measurement to liquid flow in closed conduits—weighing method. Switzerland :
- [30] Montgomery, D.C., J. 2005. *Design and Analysis of Experiments*. USA: Phoenix Color.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
ตารางความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ (ISO 4185)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
0	998.84
2	999.94
4	999.97
6	999.94
8	999.85
10	999.70
12	999.50
14	999.24
16	998.94
18	998.60
20	998.20
22	997.77
24	997.30
26	996.78
28	996.23
30	995.65
32	995.03
34	994.37

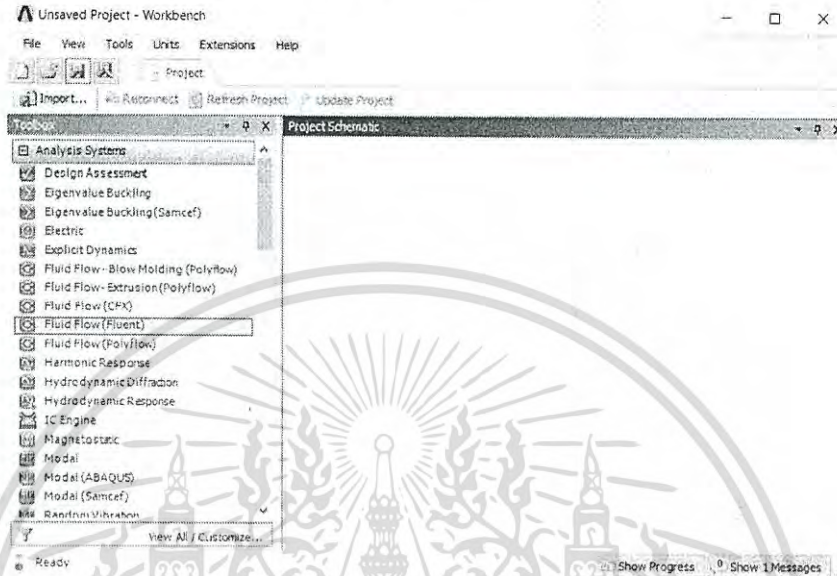
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

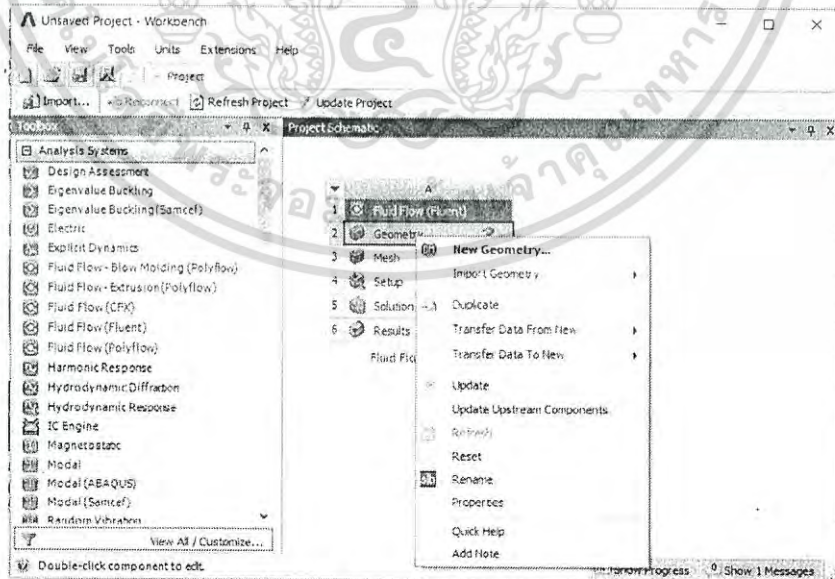
## 1. การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0

### 1.1 ดับเบิลคลิกที่ Fluid Flow (Fluent) เพื่อสร้างไฟล์งาน



รูปที่ 1 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (1)

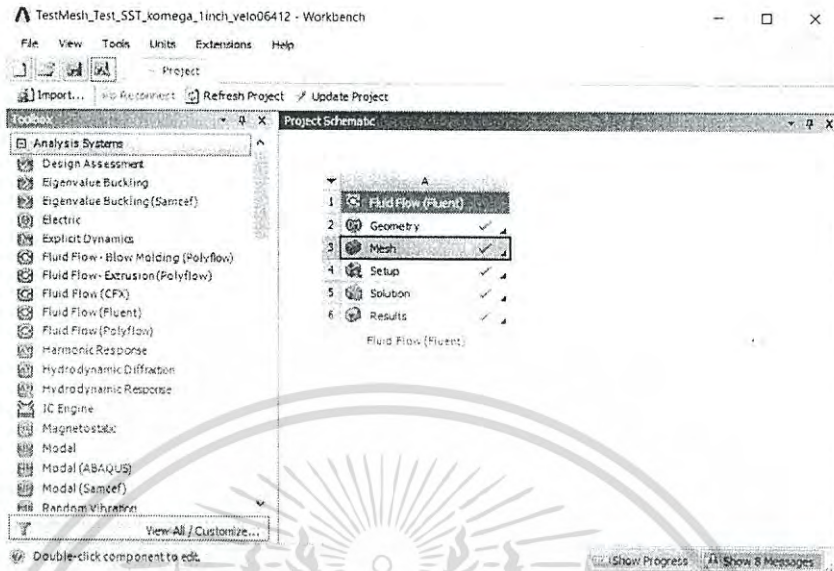
### 1.2 คลิกขวาที่ Geometry >>> Import Geometry เพื่อนำชิ้นงานเข้ามา



รูปที่ 2 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (2)

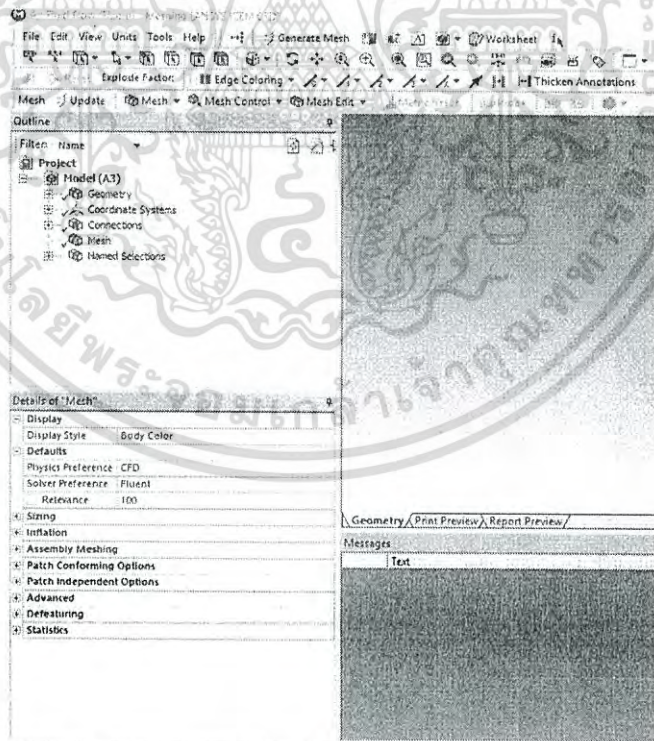
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ดับเบิลคลิกที่ Mesh



รูปที่ 3 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (3)

### 1.4 คลิกที่ Mesh



รูปที่ 4 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (4)

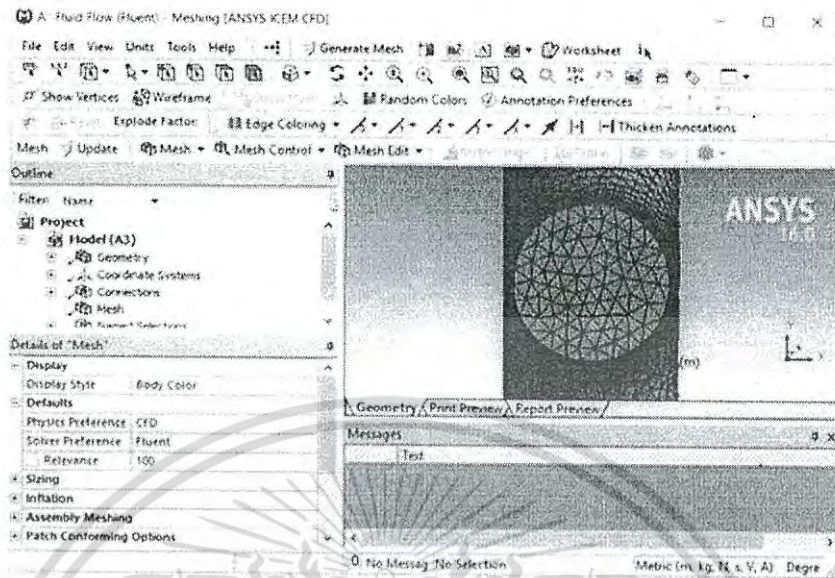
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ปรับค่าตั้งตาราง

คำสั่ง	ค่า
Relevance	100
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Inflation	
Use Automatic Inflation	Program Controlled
Inflation option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.05
Maximum Layer	10
Growth Rate	1
Inflation Algorithm	Post

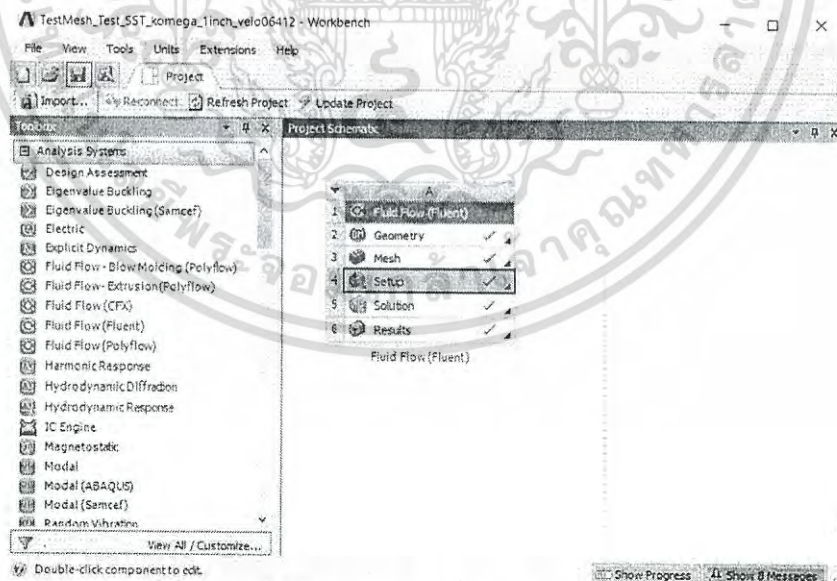
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 คลิก Generate Mesh



รูปที่ 5 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (5)

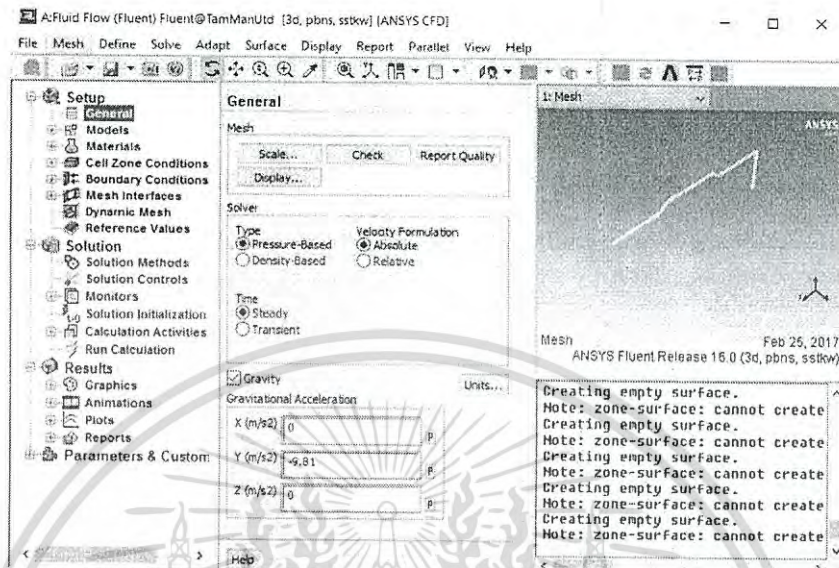
## 1.7 ดับเบิ้ลคลิก Set Up



รูปที่ 6 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (6)

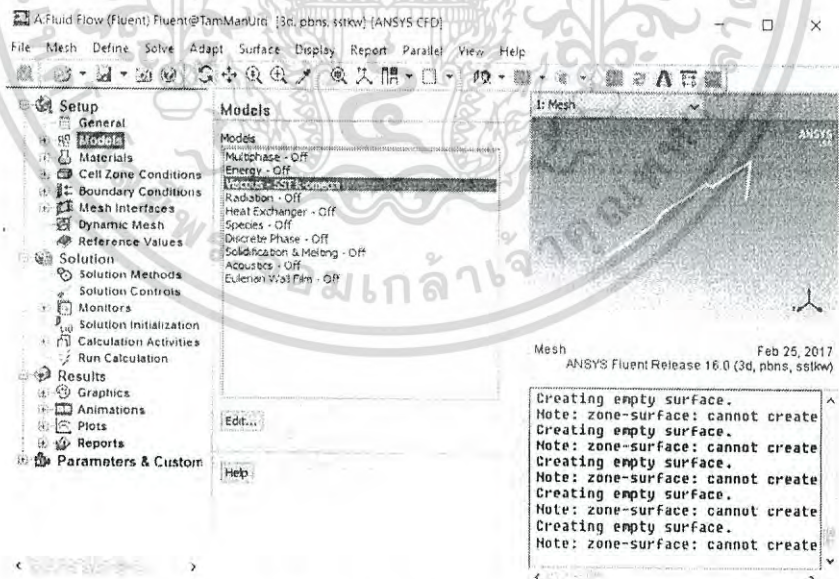
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 คลิก General >>> Gravity>>> -9.81 ที่แกน Y



รูปที่ 7 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (7)

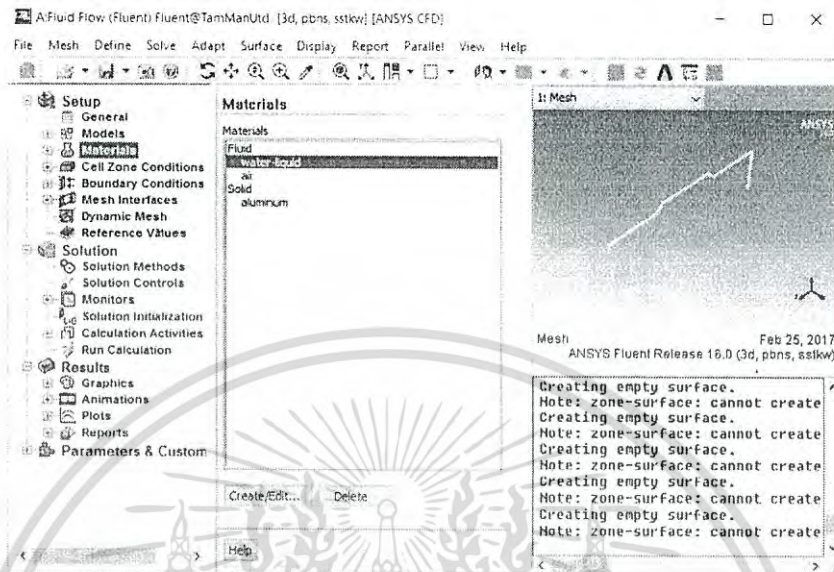
1.9 คลิก Model >>> Viscous >>> SST k- $\omega$



รูปที่ 8 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (8)

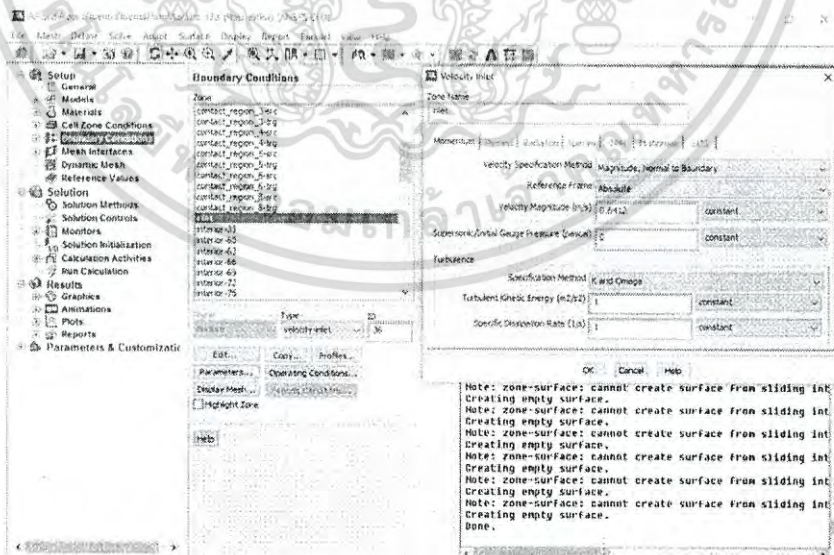
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.10 คลิก Material >>> Fluid >>> water-Liquid



รูปที่ 9 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (9)

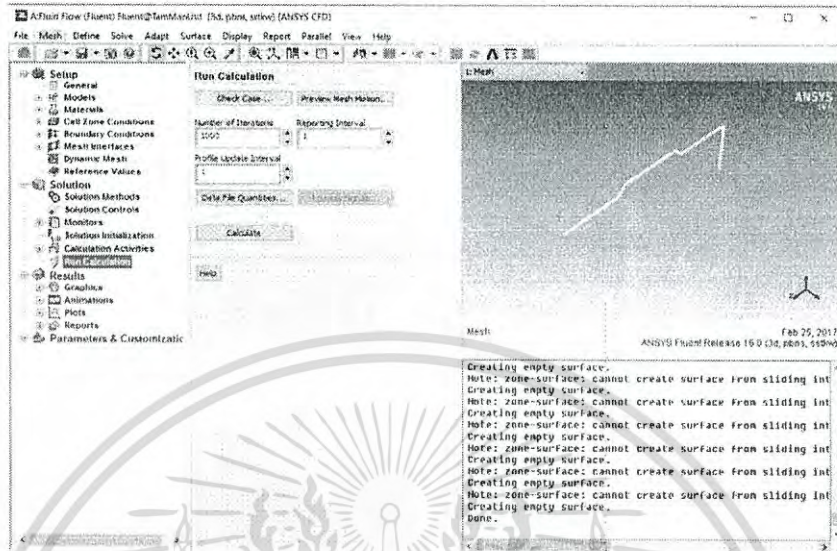
### 1.11 คลิก Boundary Condition >>> เลือกหน้าตัดทางเข้า >>> เลือก Velocity-inlet >>> ใส่ค่าความเร็ว



รูปที่ 10 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (10)

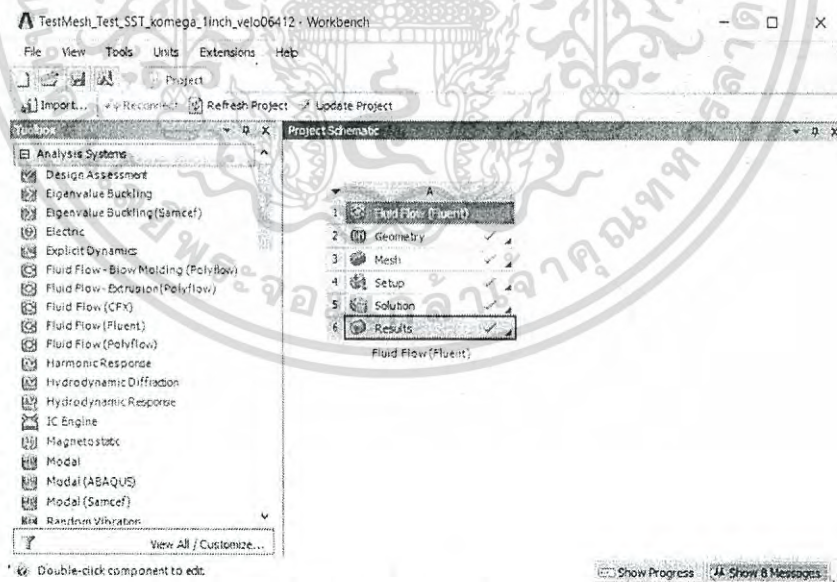
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.12 คลิก Run Calculation >>> Number of Iterations >>> 1,000



รูปที่ 11 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (11)

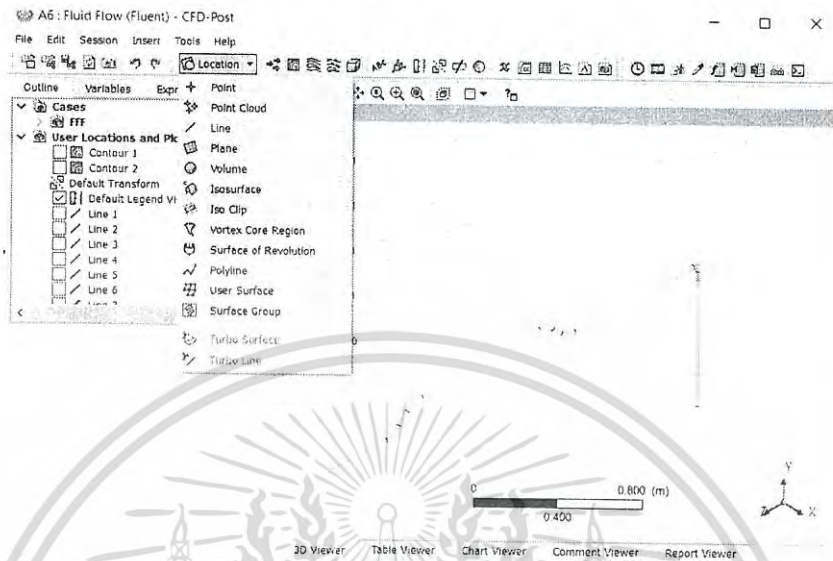
1.13 หลังการคำนวณเสร็จสิ้น ดับเบิลคลิก Results



รูปที่ 12 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (12)

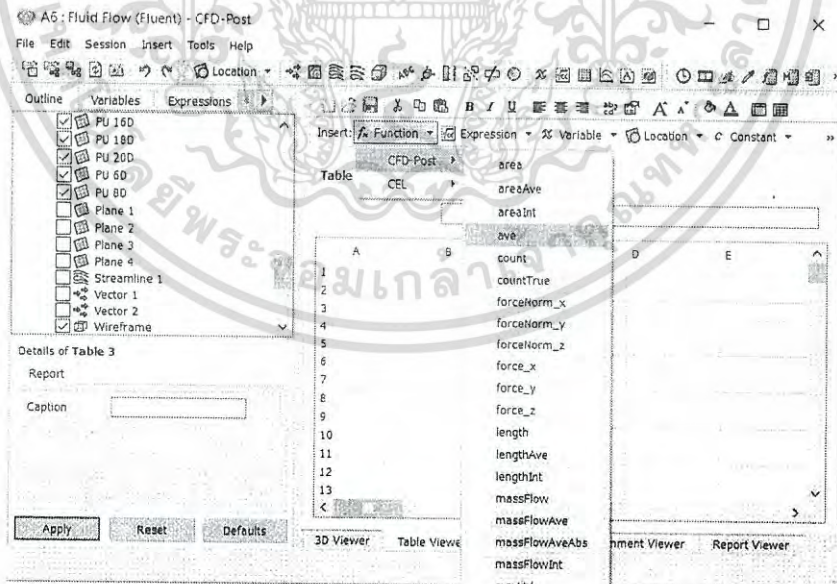
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.14 คลิก Location >>> Line >>> ใส่ค่าตำแหน่ง



รูปที่ 13 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (13)

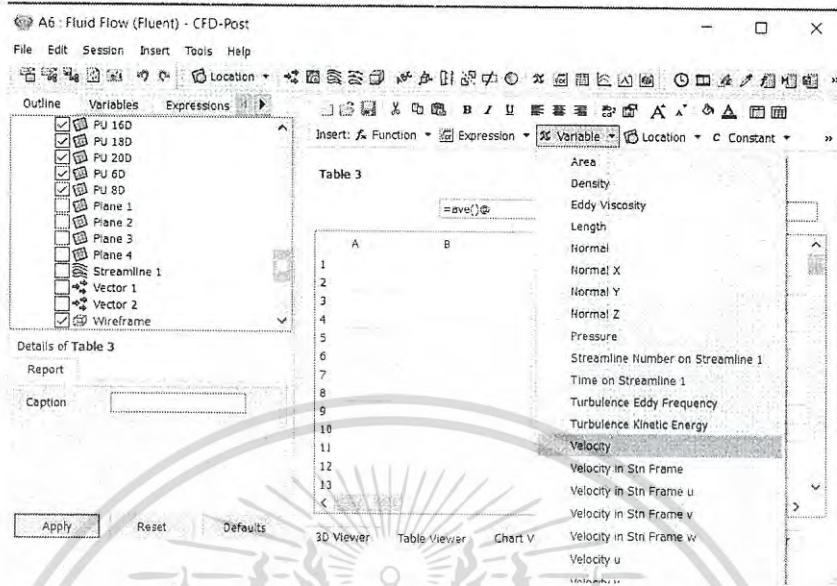
### 1.15 เลือก Table >>> Function >>> CFD-Post >>> ave (ค่าเฉลี่ย)



รูปที่ 14 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (14)

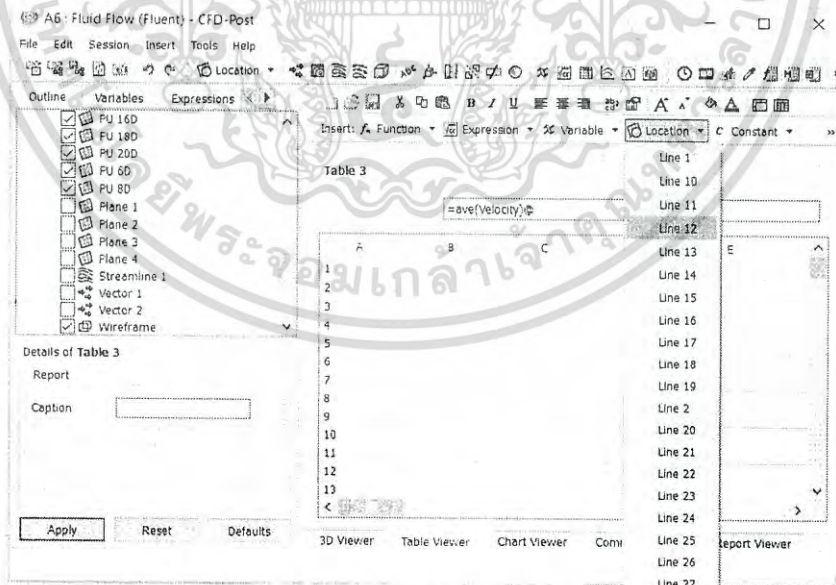
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.16 เลือก Variable >>> Velocity



รูปที่ 15 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (15)

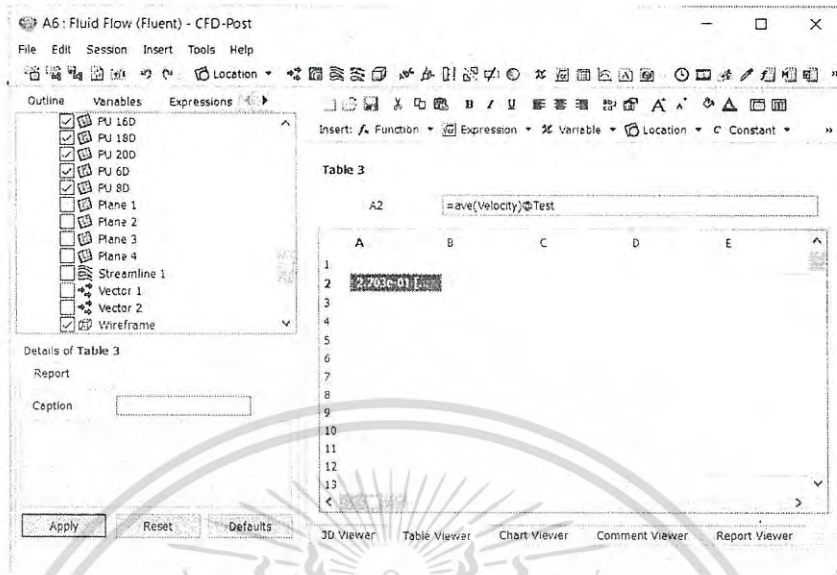
1.17 เลือก Location >>> เลือกตำแหน่งที่ต้องการ



รูปที่ 16 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.18 นำความเร็วจากตำแหน่งที่ต้องการไปคิดหาเวลาส่งผ่านและหาความเร็วเฉลี่ย



รูปที่ 17 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค  
ความเร็วจากการคำนวณโดยหลักการของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. การคำนวณความเร็วจากหลักการของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

1.1 นำความเร็วที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณทั้ง 10 ส่วน แทนลงในสมการ 2.9 และ 2.10 เพื่อคำนวณค่าเวลาส่งผ่านในทิศตามการไหลและทวนการไหลในแต่ละส่วน

ระยะติดตั้ง 20D, 10D

	เวลาจาก CFD		เวลาส่งผ่านทิศตามการไหล		เวลาส่งผ่านทิศทวนการไหล	
1	0.12022	0.079807	0.000001960	0.000001960	0.000001959	0.000001960
2	0.633982	0.648594	0.000001960	0.000001960	0.000001959	0.000001959
3	0.718523	0.710751	0.000001960	0.000001960	0.000001959	0.000001959
4	0.772946	0.768309	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
5	0.814494	0.809094	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
6	0.83279	0.840872	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
7	0.86563	0.866067	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
8	0.883123	0.883394	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
9	0.828867	0.824386	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
10	0.078199	0.078199	0.000001960	0.000001960	0.000001960	0.000001960

รูปที่ 18 การคำนวณความเร็วจากหลักการของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก (1)

1.2 รวมค่าเวลาส่งผ่านในทิศตามการไหลและทวนการไหลในแต่ละส่วน

ระยะติดตั้ง 20D, 10D

	เวลาจาก CFD		เวลาส่งผ่านทิศตามการไหล		เวลาส่งผ่านทิศทวนการไหล	
1	0.12022	0.079807	0.000001960	0.000001960	0.000001959	0.000001960
2	0.633982	0.648594	0.000001960	0.000001960	0.000001959	0.000001959
3	0.718523	0.710751	0.000001960	0.000001960	0.000001959	0.000001959
4	0.772946	0.768309	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
5	0.814494	0.809094	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
6	0.83279	0.840872	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
7	0.86563	0.866067	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
8	0.883123	0.883394	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
9	0.828867	0.824386	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
10	0.078199	0.078199	0.000001960	0.000001960	0.000001960	0.000001960
			0.000019604	0.000019604	0.000019588	0.000019588
			sum tab	0.000039208	sum tba	0.000039177

รูปที่ 19 การคำนวณความเร็วจากหลักการของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 คำนวณความเร็วรวมจากสมการที่ 2.11 โดยใช้เวลาส่งผ่านในทิศตามและทวนการไหล

ระยะตัดตั้ง 20D, 10D

	เวลาจาก CFD		เวลาส่งผ่านทิศตามการไหล		เวลาส่งผ่านทิศทวนการไหล	
1	0.12022	0.079807	0.000001960	0.000001960	0.000001959	0.000001960
2	0.633982	0.648594	0.000001960	0.000001960	0.000001959	0.000001959
3	0.718523	0.710751	0.000001960	0.000001960	0.000001959	0.000001959
4	0.772946	0.768309	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
5	0.814494	0.809094	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
6	0.83279	0.840872	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
7	0.86563	0.866067	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
8	0.883123	0.883394	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
9	0.828867	0.824386	0.000001961	0.000001961	0.000001959	0.000001959
10	0.078199	0.078199	0.000001960	0.000001960	0.000001960	0.000001960
			0.000019604	0.000019604	0.000019588	0.000019588
			sum tab	0.000039208	sum tba	0.000039177
			velocity	0.587616654		

รูปที่ 20 การคำนวณความเร็วจากหลักการของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก (3)



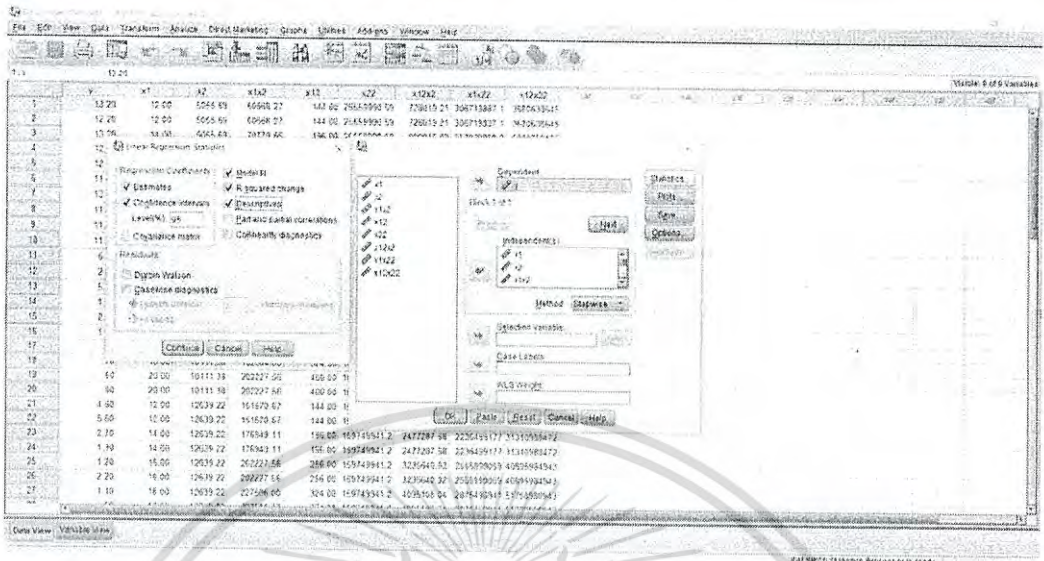
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

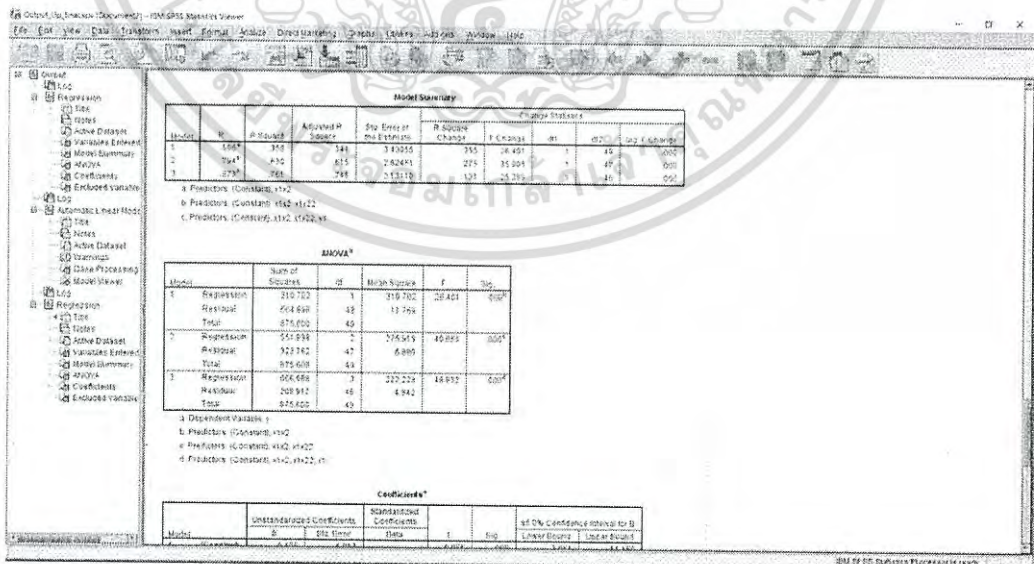


1.3 เลือกตัวแปรต้นและตัวแปรตาม >>> เลือก Statistics >>> ตั้งค่าความเชื่อมั่น 95 %



รูปที่ 23 การวิเคราะห์ความถดถอย (3)

1.4 ดู Model Summary >>> เลือกโมเดลที่มีค่า Adjusted R Square และ Std. Error of the Estimate ที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 24 การวิเคราะห์ความถดถอย (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ดู Coefficients >>> นำค่า Unstandardized Coefficients (B) ของโมเดลที่เหมาะสม มาสร้างสมการ โดย Excluded Variables คือ ตัวแปรที่ได้รับการยกเว้นในสมการ

**Coefficients\***

Model	Unstandardized Coefficients	Standardized Coefficients		t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
		B	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1. Constant		3.105	1.037				
	U1	-1.927E-021	.000	-1.946	0.055	-.000	-.000
	U2	1E-210	.000	1.484	0.139	-.000	-.000
2. Constant		2.154E-009	.000	-1.156	0.249	-.000	-.000
	U1	10.114	1.231	8.242	.000	6.929	13.309
	U2	.000	.000	-4.781	0.000	-.000	-.000
3. Constant		4.278E-005	.000	4.123	0.000	-.000	-.000
	U1	.000	.000	1.444	0.152	-.000	-.000
	U2	.000	.000	1.444	0.152	-.000	-.000

**Excluded Variables\***

Model	Beta In	t	Sig.	Coefficient	
				Unstandardized	Standardized
1	U1	-.043	-.365	-.054	.394
	U2	-.027	-.055	-.010	.131
	Re	-.042	-.370	-.054	.365
2	U1	.817	2.174	.032	.153
	U2	.393	.863	.393	.076
	Re	2.104	5.813	.000	.939
3	U1	2.871	5.334	.000	.813
	U2	.451	1.025	.308	.561
	Re	-1.170	-4.911	.000	.431
4	U1	.483	2.028	.046	.142
	U2	1.843	4.009	.000	.584
	Re	1.811	4.748	.000	.614
5	U1	1.988	3.995	.000	.639
	U2	.227	1.052	.291	.520

รูปที่ 25 การวิเคราะห์ความถดถอย (5)

1.6 สร้างสมการโพลีโนเมียลตามค่า Coefficients ของโมเดลที่เหมาะสม

$$\Delta E = 10.114 + 0.726U_s - 1.52 \times 10^{-4}U_s R_e - 4.275 \times 10^{-9}U_s R_e^2 \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0.746 \text{ และ } SEE = 2.131$$

รูปที่ 26 การวิเคราะห์ความถดถอย (6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lecture Notes in Engineering and Computer Science

IMECS 2017

International MultiConference of  
**Engineers and Computer  
Scientists 2017**

**Hong Kong**  
**15-17 March, 2017**

W. An  
Oscar Corallo  
Chris Doughs  
David Yuan Feng  
A. M. Korsunsky (Eds.)



International Association of Engineers

ISBN: 978-988-140473-2

ISSN: 2078-0958

# Effect of Installation Angle of Ultrasonic Flow Meter on Water Velocity Measurement in Pipe

P. Siriparinyanan, T. Suesut, and N. Nunak



The difference of transit time between the two sound waves traveling along and against to the flow is used to calculate the flow velocity. The transit time ultrasonic flow meter operates well with clear and no particles in fluid, e.g., water, clear liquids, and viscous liquids.

However, many factors affect velocity measurement of ultrasonic flow meter e.g., type of fluids, sound speed in fluid, flow characteristics, pipe characteristics (roughness, type of materials, coating, diameter), straight run before and

After the installation of ultrasonic flow meter has been completed, the sound waves will be transmitted and received. The ultrasonic sound waves will be transmitted from upstream and downstream transducers in reciprocal, which mean that the ultrasonic sound signal will be the same whether the transducer is used as a transmitter or a receiver. The transducers were designed to transmit sound wave in different types of pattern, e.g., from omnidirectional to very narrow beams.

For water velocity measurement, the ultrasonic sound signal is carried by the fluid particles, so that sound speed traveling through water is the sum or difference of its own speed and the fluid speed. This is the fundamental of the transit time ultrasonic flow meter, which uses the difference of transit time in an upstream and a downstream direction. The transit-time for the ultrasonic sound signal can be calculated using (1)

Manuscript received December 21, 2016; revised January 09, 2017.  
 P. Siriparinyanan is with department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (e-mail: Ponthakorn.siri@gmail.com).  
 T. Suesut is with department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (e-mail: taweepol.su@kmitl.ac.th).  
 N. Nunak is with department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (corresponding author e-mail: navaphatra@gmail.com).

$$V_{true} = L \times (t_{AB} - t_{BA}) / (t_{AB} \times t_{BA} \times 2 \cos \theta) \tag{1}$$

$$t_{AB} = L / (C + V \cos \theta) \tag{2}$$

$$t_{BA} = L / (C - V \cos \theta) \tag{3}$$

where  $t_{AB}$  and  $t_{BA}$  is the transit time from transducer A to B (s) and transit time from transducer B to A (s), respectively. The transit time between transducer A and B is calculated using (2) and (3), which is the sum and the difference of sound speed in water ( $C = 1,491$  m/s in water at a temperature of 23 °C at atmospheric pressure) and water velocity ( $V$ ; m/s).  $L$  is the path length (m),  $\theta$  is path angle, and  $V_{line}$  is an average velocity of water across the channel in the direction of flow (m/s) [13]. If the sound transmits through the moving fluid, then the apparent speed is obtained from the hypotenuse of the triangle in Fig. 1 [1].

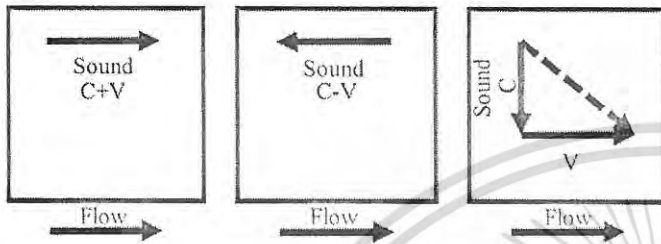


Fig. 1. Apparent sound speed as viewed by an observer outside the moving fluid (Modified from [1])

### B. Computational Fluid Dynamic

Computational Fluid Dynamic (CFD) is the part of fluid dynamics, which is used for actual flow simulation by mathematical model, numerical method, and CFD software. In case of Newtonian fluid dynamic, the Navier-Stokes equations were used to simulate the real flow in the pipe. In this paper, the Transport equations of Realizable k-ε model as shown in (4), which improved predictions for the spreading rate of both planar and round jets, is used for simulation

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon + \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \quad (4)$$

where  $P_k$  is the generation of turbulence kinetic energy due to the mean velocity gradients and  $P_b$  is the generation of turbulence kinetic energy due to buoyancy. [14].

### C. Measurement of liquid flow in closed conduits - Weighing method (ISO 4185)

This standard specifies a method of liquid velocity measurement in a pipe by measuring the mass of liquid in weighing tank with an interval time. The relation between mass and density of liquid is used for converting to liquid velocity in a pipe. Diverter, which is a moving device used to change flow direction of liquid into weighing tank, and weighing scale, which is a device for measuring the mass of liquid in weighing tank, are the most important part of this

method. The motion of diverter must be quick in order to eliminate the effect of residual liquid. Also, the high resolution weighing scale is needed in order to eliminate the error. [15]

## III. EXPERIMENTAL

### A. Experimental Setup

Experimental unit (Fig. 2) consisted of an ultrasonic flow meter, a centrifugal pump, a testing section installed with a flow meter, a diverter, weighing tank, and a storage tank. The measuring section was located at 20D from the 45° elbow. A flow meter used in this experiment was a transit time ultrasonic flow meter (Fuji Electric System Co., Ltd. FSD220Y1), which distance between the two transducers was set at 12.9 mm (75° path angle). The water was circulated by a centrifugal pump from a storage tank to the testing section. The horizontal pipe was made of Polyvinyl chloride, of which the total length, inner diameter (D) and wall thickness were 32 inches, 1 inch and 2 mm, respectively. Weighing scale with resolution 1 g was used in this paper to measure the mass of water in weighing tank (CST: CDR-30).

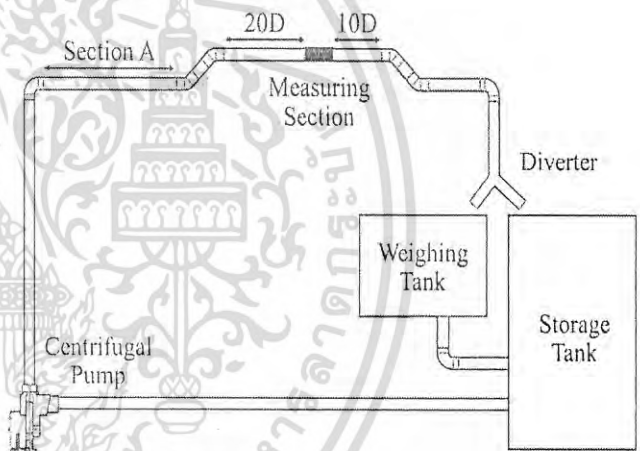


Fig. 2. Flow rate test section

### B. Measurement Method

Before the experimental data were recorded, water was freely circulated at least 30 minutes for steady flow. The inlet water velocity measured at the section A using transit time ultrasonic flow meter was set at 0.28 and 0.64 m/s with the Reynolds number of 7,077 and 16,178, respectively. Flow characteristics at section A were assumed to be the same as the measuring section. Two transducers were mounted in the V method (Fig. 3) at the path angles of 45°, 55°, 65°, 75° (reference condition recommended by manufacturer), and 85°, respectively. The measured velocity of water by ultrasonic flow meter at various path angles was compared with the simulated results by CFD and that obtained from weighing method (reference velocity).

For the weighing method, the filling time was 10 s and 5s for water velocity of 0.28 m/s and 0.64 m/s, respectively. The delay time of diverter was 0.3 s, which used to compensate the loss of mass. Then, mass of water was converted to velocity by mass related corrections for the water properties at a temperature of 23 °C.

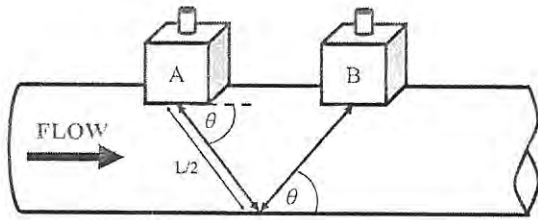


Fig. 3. Path angle condition of transit time ultrasonic flow meter (Modified from [7])

C. CFD Flow simulation

In this study, the 3-dimensional CFD flow simulation was carried out under fully developed turbulent flow. Input parameters of CFD software were boundary conditions, solution methods, and number of iterations used for prediction of velocity of fluid particles at each point of path length (see table I). Another important key for CFD flow simulation was generation of the grid as it governed the stability and accuracy of the flow predictions. In case of this experiment, three types of mesh e.g., Hexahedra, Prisms, and Tetrahedral, a simple method and a save time consumption for mesh generation, were chosen. There were 238,491 meshes in horizontal pipe. Flow simulation of the water in pipe diameter of 1 inch, mounted with two transducers of ultrasonic flow meter at different path angles was processed by CFD.

TABLE I  
BOUNDARY CONDITIONS, SOLUTION METHODS AND CALCULATION USED IN WATER FLOW SIMULATIONS

Detail	Values
Boundary Conditions	
Inlet water velocity	0.28 m/s
Outlet pressure	0.64 m/s
Density of water	101.325 kPa
Viscosity of water	998.2 kg/m <sup>3</sup> (23 °C)
Viscosity of water	0.001003 Pa·s (23 °C)
Solution Methods	
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
Calculation	
Number of Iterations	1000

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

The results (table II, III and Fig. 4 and 5) showed that the trend of calculated velocities from CFD flow simulation at different path angles and the measured velocities by ultrasonic flow meter had a similar trend. When comparing both results with reference velocities from the weighing method, it was found that the CFD velocity simulation had much error than the ultrasonic flow measurement, especially at the long distance of path length or at small path angle (Fig. 6). This might be due to the mathematical equation for velocity calculation (1). Since the difference of transit time ( $t_{AB}$  and  $t_{BA}$ ) increased with increasing of the path length, this caused to the evaluated velocity was lower than the actual value.

The error of velocity obtained from CFD flow simulation could be explained with many reasons. That is, the main

benefit of CFD flow simulation is to simulate the pattern of water flow in pipe in 3-dimensional flow so that generally, qualitative data are used to explain the flow characteristics of water. Since average velocities were calculated from a simulated quantitative data at each point along the path length, it was a cause of an obtained error. Another reason is the selected equation for simulation, Realizable k-ε model, is suitable for the uniform turbulent flow across the cross-section along the length of pipe, whereas the actual flow characteristic of liquid in pipe is a complex pattern (Fig. 7) [16].

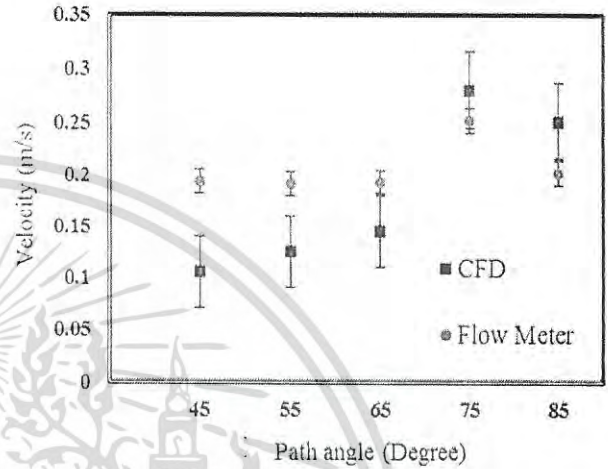


Fig. 4. Comparison of water velocity obtained from CFD flow simulation and ultrasonic flow meter at inlet water velocity of 0.28 m/s .

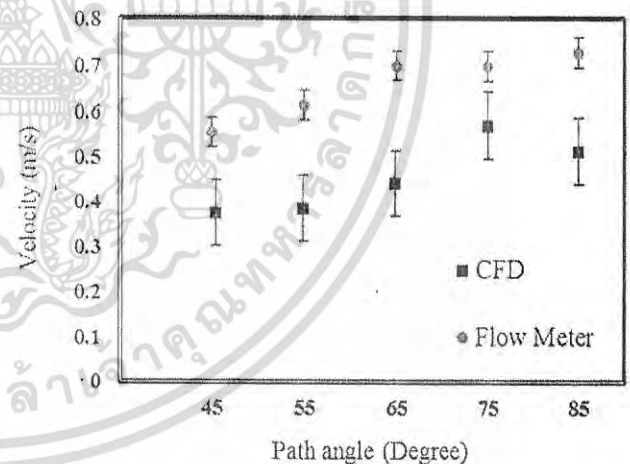


Fig. 5. Comparison of water velocity obtained from CFD flow simulation and ultrasonic flow meter at inlet water velocity of 0.64 m/s.

According to a 75° path angle was recommended by manufacturer for mounting an upstream transducer and a downstream transducer, the error of velocity measurement at this condition had the lowest. The more difference of path angle away from the recommendation was set, the more error was obtained. The velocities measurement at the path angles of 65° and 85° were almost the same because they had an equal difference of path angle from the one that suggested in the specification. It mean that the path lengths of installation angle at 65° to 85° has no a significant effect on the velocity measurement.

TABLE II  
THE COMPARISON OF WEIGHING METHOD, CFD SIMULATION, AND ULTRASONIC FLOW METER

INLET VELOCITY (M/S)	WATER VELOCITY WITH DIFFERENT PATH ANGLES (M/S)														
	85°			75°			65°			55°			45°		
	Ref.	CFD	Flow meter	Ref.	CFD	Flow meter	Ref.	CFD	Flow meter	Ref.	CFD	Flow meter	Ref.	CFD	Flow meter
0.28	0.272	0.252	0.202	0.279	0.281	0.252	0.254	0.145	0.193	0.248	0.125	0.192	0.248	0.106	0.194
0.64	0.652	0.515	0.729	0.652	0.571	0.700	0.650	0.421	0.700	0.661	0.392	0.616	0.660	0.386	0.557

TABLE III  
RELATIVE ERRORS BETWEEN VELOCITY FROM WEIGHING METHOD AND VELOCITY FROM CFD SIMULATION, ULTRASONIC FLOW METER

INLET VELOCITY (M/S)	RELATIVE ERROR WITH DIFFERENT PATH ANGLES (%)									
	85°		75°		65°		55°		45°	
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
0.28	7.35	25.74	0.72	9.67	42.91	24.02	49.60	22.58	57.26	21.77
0.64	1.99	11.81	2.91	7.36	35.23	7.69	39.94	6.81	41.52	15.61

Note:  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  is the relative error between velocity from weighing method and CFD flow simulation and flow meter, respectively.

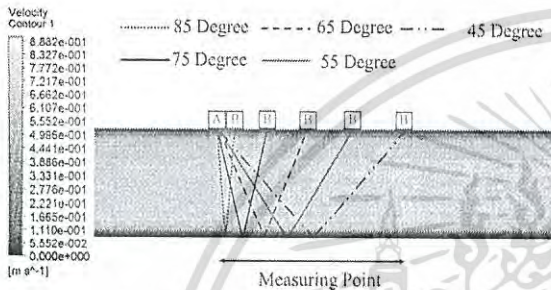


Fig. 6. Water velocity contour of 1 inch horizontal pipe with 45° elbow at inlet water velocity of 0.64 m/s

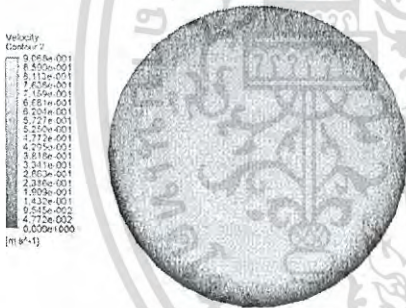


Fig. 7. Water velocity contour of cross section 1 inch horizontal pipe with 45° elbow at inlet water velocity of 0.64 m/s

V. CONCLUSION

The installation path angle is a significant factor, which affect the accurate velocity measurement with transit time ultrasonic flow meter. From this study, it can be concluded that the installation angle had an effect on the error of velocity measurement with an ultrasonic flow meter. The accuracy decreased as the increasing of the difference of path angle from the recommendation. The CFD flow simulation showed the velocity of water at each point of fluid particles and could be used to explain the effect occurred from the installation transducers. However, the estimated velocities had much lower than the actual ones, especially at the small installation angles. Also, it was observed that the wrong evaluation was in the relationship between the transit times and path angles with the exponential equation. Therefore, this will be brought to compensate in the CFD simulation in the future work.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to extend grateful thanks to the MWA of Thailand for supporting an ultrasonic flow meter and technical information and thanks to our colleague Mr. Anek Soisup for all his technical support.

REFERENCES

- [1] R. C. Baker, *Flow Measurement Handbook*, Cambridge university Press, New York, 2000.
- [2] L. C. Lynnworth, and, Y. Liu, "Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005," *Ultrasonic.*, vol. 44, pp. e1371–e1378, 2006.
- [3] N. C. Temperley, and, M. Behnia, A. F. Colling, "Flow patterns in an ultrasonic liquid flow meter," *Flow Measurement and Instrumentation.*, vol. 11, pp. 11–18, 2000.
- [4] J. Berrebi, P. E. Martinsson, M. Willatzen, and, J. Delsing, "Ultrasonic flow metering errors due to pulsating flow," *Flow Measurement and Instrumentation.*, vol. 15, pp. 179–185, 2004.
- [5] L. Ma, J. Liu, and, J. Wang, "Study of the accuracy of ultrasonic flowmeters for liquid," *2012 AASRI Conference on Modelling, Identification and Control*, vol. 3, no. 1, pp. 14–20, 2012.
- [6] B. Svensson, and, J. Delsing, "Application of ultrasonic clamp-on flow meters for in situ tests of billing meters in district heating systems," *Flow Measurement and Instrumentation.*, vol. 9, pp. 33–41, 1998.
- [7] C. Ruppel, and, F. Peters, "Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter," *Flow Measurement and Instrumentation.*, vol. 15, pp. 167–177, 2004.
- [8] C. Wang, T. Meng, H. M. Hu, and, L. Zhang, "Accuracy of the ultrasonic flow meter used in the hydro turbine intake penstock of the Three Gorges Power Station," *Flow Measurement and Instrumentation.*, vol. 25, pp. 32–39, 2012.
- [9] W. D. Cairney, "Typical flow measurement problems and their solution in the electricity supply industry," *J. Flow Meas. Instrum.*, vol. 2, pp. 217–24, 1991.
- [10] M. Holm, J. Stang, and, J. Delsing, "Simulation of flow meter calibration factors for various installation effects," *Measurement*, vol. 15, pp. 235–244, 1995.
- [11] B. Wang, X. Jin, R. Huang, and, S. Chen, "Simulation and experimental verification of a fuel calibration system based on metering cylinder," *Measurement*, vol. 38, pp. 131–138, 2014.
- [12] M. S. Shah, J. B. Joshi, A. S. Kalsi, C. S. R. Prasad, and, D. S. Shukla, "Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation," *Chemical Engineering Science*, vol. 71, pp. 300–309, 2012.
- [13] International Standard ISO 6416: Hydrometry - Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method, 2004.
- [14] L. Davidson, "An introduction to turbulence models," *Technical Report 97/2, Dept. of Thermo and Fluid Dynamics.*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2016.
- [15] International Standard ISO 4185: Measurement of liquid flow in closed conduits—weighing method, first ed. ISO; Beuth Verlag, Berlin, 1980.
- [16] K. Asteriadou, A. P. Hasting, M. R. Bird, and, J. Melro, "Computational Fluid dynamic for the prediction of temperature profiles and hygienic design in food industry," *Food and Bioprocess Processing*, vol. 84(C2), pp. 157–163, 2006.

ไม่วารณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย พนธกร ศิริปริญญาพันธ์  
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 80/18 ถนนสุรศักดิ์ แขวงสีลม เขตบางรัก จังหวัดกรุงเทพมหานคร

### ประวัติการศึกษา

2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประสบการณ์การทำงานและความเชี่ยวชาญ

- งานวิจัยเรื่อง ผลของลักษณะพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีต่อการสะสมของสารอินทรีย์
- งานวิจัยเรื่อง ผลของการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่มีต่อความถูกต้องของการวัดความเร็วน้ำภายในท่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้