

การสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบสูบน้ำประปาเพื่อประมาณค่า
ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

THE SIMILARITY MODEL OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM FOR ERROR
ESTIMATION OF ULTRASONIC FLOW METER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-270-041

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบส่งน้ำประปาเพื่อประมาณค่า
ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

THE SIMILARITY MODEL OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM FOR ERROR
ESTIMATION OF ULTRASONIC FLOW METER



T148799



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **148799**
ชั้นเดือนปี **23 11 ๒ ๖5๐๓**

b. **00266915**
l.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-270-041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE SIMILARITY MODEL OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM FOR ERROR
ESTIMATION OF ULTRASONIC FLOW METER



THIS THESIS IS 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

KMITL-2017-EN-M-270-041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันฯ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบสูบน้ำประปาเพื่อประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

Thesis Title The Similarity Model of Water Distribution System for Error Estimation of Ultrasonic Flow Meter

นักศึกษา นายรัฐโชติ วชิรปัญญานนท์

รหัสประจำตัว 59601302

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.นวกัทธา หนูนา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-270-041

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.ยุทธพงศ์	ทำผดุง	
รศ.ดร.ทวีพล	ชื้อสัตย์	
ดร.เอกพงษ์	ชีวิตโสภณ	
ดร.เจษฎา	ชัยโณม	
รศ.ดร.นวกัทธา	หนูนา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2560 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)  ด้านการค้ำ

ไม่อาจกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบสูบน้ำประปาเพื่อประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

นักศึกษา

นายรัฐโชติ วชิรปัญญานนท์

รหัสประจำตัว

59601302

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมอาหาร

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ. ดร.นวกัษรา หนูนาค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)

รศ. ดร.ทวีพล ชี้อัสต์ย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบสูบน้ำประปาเพื่อประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน ด้วยการวิเคราะห์มิติแบบวิธีบักกิงแฮม ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรต้น คือ ลักษณะท่อ ได้แก่ ขนาดท่อ (D) ลักษณะของไหล ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) ความหนืด (μ) ความเร็ว (v) และระยะที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวน (L_c) และการติดตั้งเครื่องมือวัด ได้แก่ ระยะอัสตรีม (U_s) และระยะดาว์นสตรีม (D_s) และตัวแปรตาม คือ ความคลาดเคลื่อนจากการวัดการไหล (E) ซึ่งสามารถจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ ดังนี้ ($E \frac{L_c}{D}$), ($\frac{\rho v D}{\mu}$), ($\frac{L_c}{D}$), ($\frac{U_s}{L_c}$) และ ($\frac{D_s}{L_c}$) จากนั้นทำการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วน้ำด้วยการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลบนชุดทดลอง ที่ระยะอัสตรีม 2D ถึง 20D และระยะดาว์นสตรีม 2D ถึง 10D โดยน้ำไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ผ่านข้อต่อ 45 องศา ในทิศทางการไหลขึ้นและทิศทางการไหลลง ที่ความเร็ว 0.2, 0.5 และ 1 เมตรต่อวินาที โดยเปรียบเทียบกับความเร็วที่ได้จากวิธีการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ ผลของความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จากแบบจำลอง นำมาใช้สำหรับการพยากรณ์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการวัดการไหลในท่อที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ที่ตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ในระยะอัสตรีมและดาว์นสตรีมต่าง ๆ ซึ่งจากการทวนสอบสมการพยากรณ์ต้นแบบ โดยใช้ท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร ทำนายความคลาดเคลื่อนของท่อขนาด 5.08 เซนติเมตร พบว่า มีค่าแตกต่างของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 10 ซึ่งระยะอัสตรีมและดาว์นสตรีมอยู่ในช่วง 8D-20D และ 6D-10D ตามลำดับ สรุปได้ว่า สมการพยากรณ์ต้นแบบสามารถใช้ทำนายความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับท่อขนาดต่าง ๆ ได้ โดยขอบเขตการทำนายจะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อที่เอานำมาใช้ในแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Similarity Model of Water Distribution System for Error Estimation of Ultrasonic Flow Meter
Student	Mr.Rattachot Wachirapunyanont
Student ID.	59601302
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Navaphattra Nunak
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr.Taweepol Suesut

ABSTRACT

This thesis proposes the similarity model of water distribution system based on the theory of Buckingham Pi for error estimation of transit time ultrasonic flow meter with clamp on. There are three independent parameter groups, namely pipe characteristic, i.e. internal diameter (D), fluid characteristic, i.e. density (ρ), absolute viscosity (μ), velocity (v) and disturbance region (L_e), and meter installation, i.e. upstream distance (U_s) and downstream distance (D_s). The dependent parameter is the error of flow measurement (E) being the difference between the velocity measured from ultrasonic flow meter and from weighing method. They could be arranged in five Pi terms that are $(E \frac{L_e}{D})$, $(\frac{\rho v D}{\mu})$, $(\frac{L_e}{D})$, $(\frac{U_s}{L_e})$ and $(\frac{D_s}{L_e})$. The water velocity measurement flowing through pipe diameter of 2.54 and 5.08 cm and elbow ± 45 degrees was conducted on the model by mounting the upstream sensor in the range of $2D$ to $20D$ and the downstream stream sensor in the range of $2D$ to $10D$ at different velocities of 0.2 0.5 and 1 m/s. For validation of the predictive equation using the data of pipe diameter of 2.54 cm to predict the error occurred on the pipe diameter of 5.08 cm, it was found that the differences of errors were less than 10% for the mounting of upstream and downstream sensors in the range of $8D$ to $20D$ and $6D$ to $10D$, respectively. In summary, the proposed predictive equation could be used to predict the error occurred on different sizes of pipe depending on the size of model pipe.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.นวกัทธา หนูนาค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา และขอขอบคุณ รศ. ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่ช่วยทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี และที่ขาดไม่ได้คือคณาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมอาหารทุกท่านที่ให้ความรู้และสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ รวมถึงอุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสร็จสิ้น

ขอขอบคุณการประสานครหลวงที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกสำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ เช่น คุณ เมธินี สงไทย และเพื่อนนักศึกษาทุกคนที่ให้การช่วยเหลือจนโครงการวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จ

รัฐโชติ วชิรปัญญานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร.....	5
2.1 การวิเคราะห์เชิงมิติและสภาพเสมือนจริง.....	5
2.1.1 หน่วยและมิติ.....	5
2.1.2 การวิเคราะห์มิติ.....	6
2.1.3 การสร้างแบบจำลอง.....	6
2.2 เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน.....	7
2.3 มาตรฐาน ISO 4185:1980.....	8
2.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนของการวัดการไหลด้วยคลื่นอัลตรา- โซนิก.....	8
2.4.1 คุณลักษณะการไหล.....	9
2.4.1.1 คุณสมบัติของไหล.....	9
2.4.1.2 อุณหภูมิของไหล.....	9
2.4.1.3 ความเร็วการไหล.....	9
2.4.1.4 ระยะเวลาที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวน.....	10
2.4.2 ลักษณะท่อ.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ.....	10
2.4.2.2 วัสดุและความหนาท่อ.....	11
2.4.2.3 วัสดุและความหนาของตะกรัน.....	11
2.4.3 การติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก.....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หิมิตีเครื่องมือวัดอัตราการไหล.....	12
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	14
3.1 การสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบการประปานครหลวง.....	14
3.1.1 ระบบท่อน้ำการประปา.....	14
3.1.2 การวิเคราะห์หิมิตี.....	16
3.1.3 การสร้างแบบจำลอง.....	18
3.2 อุปกรณ์ทดลอง.....	20
3.2.1 การออกแบบชุดทดลอง.....	20
3.2.2 เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก.....	23
3.3.3 การทดลองเบื้องต้น.....	24
3.3 วิธีการทดลอง.....	25
3.3.1 การเตรียมระบบก่อนเริ่มทดลอง.....	25
3.3.2 การควบคุมความเร็วการไหลของน้ำ.....	25
3.3.3 ค่าปรับแก้ที่เกิดจากเวลาในการเปลี่ยนแปลงทิศทางของวาล์วควบคุม ทิศทาง.....	25
3.3.4 การทดลอง.....	26
3.3.4.1 การหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด.....	26
3.3.4.2 การหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดที่ระยะต่าง ๆ.....	28
3.3.4.3 การทวนสอบสมการพยากรณ์ต้นแบบ.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล.....	30
4.1 ความถูกต้องและความเที่ยงตรงของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหล แบบอัลตราโซนิก.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ความคลาดเคลื่อนของความเร็วน้ำในท่อโดยติดตั้งเซนเซอร์ที่ระยะอัดสตรีม และดาว์นสตรีมต่าง ๆ.....	31
4.3 การทวนสอบสมการพยากรณ์ต้นแบบ.....	39
4.4 ขอบเขตการใช้งานสมการพยากรณ์ต้นแบบ.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	49
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	53
ประวัติผู้เขียน.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างมิติและหน่วยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับของไหล.....	5
3.1 ตัวแปรและมิติที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนของการวัดด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก.....	16
3.2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์และส่วนประกอบของชุดทดลอง.....	23
3.3 ค่ามวลชลตเซยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและความเร็วต่าง ๆ.....	26
3.4 ปัจจัยและช่วงการทดลอง.....	28
4.1 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร	32
4.2 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร.....	33
4.3 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 1.0 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร.....	34
4.4 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร.....	35
4.5 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร.....	36
4.6 ร้อยละความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วโดยเครื่องวัดการไหลที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ.....	37
4.7 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ได้จากสมการพยากรณ์ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากชุดทดลอง ที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

4.8 ร้อยละค่าความแตกต่างระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ได้จากสมการพยากรณ์ และคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากชุดทดลอง.....	43
4.9 ขอบเขตระยะอัปสตรีมการใช้งานสมการพยากรณ์ต้นแบบ ในกรณีที่ใช้ท่อขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของแบบจำลอง.....	46
4.10 ขอบเขตการดาวน์สตรีมการใช้งานสมการพยากรณ์ต้นแบบ ในกรณีที่ใช้ท่อขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของแบบจำลอง.....	47



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่านติดตั้งแบบวี.....	7
2.2 แผนภาพของการสอบเทียบเครื่องมือวัดการไหลโดยใช้มาตรฐาน ISO 4185.....	8
2.3 แนวเส้นความเร็วภายในท่อ.....	10
2.4 ระยะเวลาการติดตั้งของเครื่องมือวัดการไหล.....	12
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (มิลลิเมตร) กับจำนวนจุดวัดท ขนาดท่อต่าง ๆ.....	15
3.2 ระยะเวลาที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวน (L_e) และแนวเส้นการไหลภายในท่อ.....	18
3.3 ระบบที่ใช้ในการทดลอง (ก) แผนภาพในการออกแบบตาม ISO 4185 (ข) ภาพจริง ของชุดทดลอง.....	21
3.4 ส่วนทดลองประกอบด้วยข้อต่อ (ก) 45 องศาในทิศทางขึ้น (ข) 45 องศาในทิศทางลง และท่อตรง.....	22
3.5 (ก) เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกรุ่น Fuji Electric system co., Ltd. FSD220Y1 และ (ข) เซนเซอร์อัลตราโซนิกและดาวนัสตรึม.....	24
3.6 ขั้นตอนการทำงานของวาล์วเปลี่ยนทิศทาง.....	26
3.7 ลำดับการเตรียมชุดทดลองและการทดลอง.....	29
4.1 แนวเส้นความเร็วในส่วนท่อตรงหลังผ่านข้อต่อ 45 องศา.....	38
4.2 แนวเส้นความเร็วช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (ก) ตัวเลขเรย์โนลด์สูง และ (ข) ตัวเลขเรย์ โนลด์ต่ำ.....	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบท่อน้ำการประปาเป็นระบบปิดขนาดใหญ่ที่มีการไหลอย่างต่อเนื่องและไม่สามารถหยุดการไหลของน้ำได้ โดยเครื่องมือวัดการไหลของน้ำภายในท่อระบบปิด สามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มหลัก ดังนี้ เครื่องมือวัดการไหลแบบติดตั้งในท่อโดยขวางการไหล เช่น แผ่นออริฟิส (Orifice plate) ท่อเวนจูรี (Venturi tube) และนอซเซิล (Nozzle) เป็นต้น เครื่องมือวัดการไหลแบบติดตั้งในท่อโดยไม่ขวางการไหล เช่น เครื่องมือวัดการไหลแบบสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic flow meter) และเครื่องมือวัดการไหลแบบประกบภายนอก เช่น เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic flow meter) โดยเครื่องมือวัดการไหลกลุ่มแรกต้องติดตั้งเครื่องมือวัดขวางการไหลของน้ำ จึงทำให้ยากต่อการซ่อมบำรุงและการติดตั้ง สำหรับเครื่องมือวัดการไหลแบบสนามแม่เหล็กและแบบอัลตราโซนิก เป็นกลุ่มของเครื่องมือวัดที่การประปานครหลวงนิยมใช้ โดยเครื่องมือวัดแบบสนามแม่เหล็กเป็นเครื่องมือวัดที่ติดตั้งอยู่ในระบบ ทำงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจึงไม่มีส่วนประกอบใด ๆ ของเครื่องมือขัดขวางทิศทางการไหลของน้ำ ซึ่งเมื่อน้ำไหลผ่านเครื่องมือวัดจะไม่ทำให้คุณลักษณะการไหลเปลี่ยนแปลง แต่สามารถใช้วัดการไหลในท่อขนาดเล็กเท่านั้น ซึ่งขนาดที่ใช้อยู่ในช่วง 15-300 มิลลิเมตร [1] ส่วนเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก มีทั้งแบบติดตั้งภายในระบบท่อและแบบประกบภายนอกท่อ โดยแบบที่นิยมใช้ คือ ติดตั้งแบบประกบภายนอกท่อ ซึ่งเป็นการติดตั้งแบบไม่ขวางการไหล ทำให้คุณลักษณะการไหลไม่เปลี่ยนแปลง ง่ายต่อการติดตั้งและซ่อมบำรุง โดยสามารถใช้วัดการไหลในท่อขนาด 15-6,000 มิลลิเมตร [2]

การติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบต่าง ๆ เพื่อให้ค่าความเร็วที่วัดได้ถูกต้อง กำหนดให้ระยะท่อตรงปราศจากการรบกวนการไหลก่อนการติดตั้งเครื่องมือวัดหรือระยะอัปสตรีม (Upstream installation) ควรมากกว่า 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (20D) และระยะท่อตรงปราศจากการรบกวนการไหลหลังการติดตั้งเครื่องมือวัดหรือระยะดาว์นสตรีม (Downstream installation) ควรมากกว่า 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (10D) [3] แต่เนื่องจากความยาวของท่อตรงในระบบประปามีระยะทางที่ค่อนข้างจำกัด ทำให้ระยะการติดตั้งไม่เหมาะสมตามข้อกำหนด เช่น ในกรณีการเดินท่อขึ้นสะพาน หรือฝังท่อลงใต้ดิน ส่งผลให้ค่าความเร็วที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้ การวัดความเร็วของน้ำในท่อด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อน เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความเร็วเฉลี่ยของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหล ระยะเวลาพัสดริ่ม และระยะดาวนส์ตริ่ม เป็นต้น โดยเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ตัวเลขเรย์โนลด์ ระยะเวลาพัสดริ่ม และระยะดาวนส์ตริ่ม มีค่ามากขึ้นส่งผลให้มีค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดน้อยลง [4, 5]

จากข้อจำกัดเกี่ยวกับระยะติดตั้งของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกจึงจำเป็นต้องทำการทดลองหาค่าชดเชย (Correction factor) เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่าที่วัดได้ โดยวิธีการประเมินความถูกต้องของการวัดการไหลมีหลายวิธี ได้แก่ การชั่งน้ำหนักตามมาตรฐานตาม ISO 4185:1980 [6] การใช้พลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) และการใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensional analysis) เป็นต้น โดยการชั่งน้ำหนักตามมาตรฐาน ISO 4185:1980 เป็นการวัดความเร็วของของเหลวในระบบท่อปิด เพื่อสอบเทียบ และหาความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด ซึ่งไม่ครอบคลุมของเหลวที่มีสมบัติกัดกร่อนหรือเป็นพิษ และต้องมีความเร็วการไหลเชิงปริมาณของของเหลวน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที รวมถึงต้องไม่มีอากาศเหลือในระบบ ส่วนการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหล ซึ่งไม่จำเป็นต้องสร้างชุดทดลอง สามารถแสดงผลเป็นภาพได้ และใช้เวลาน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ แต่ความถูกต้องขึ้นอยู่กับความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายและแบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งอาจต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงในการคำนวณ สำหรับการวิเคราะห์เชิงมิติ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับการลดหรือเพิ่มขนาดเพื่อหาคำตอบบางส่วนของปัญหา โดยทำการทดลองกับแบบจำลองเสมือนจริงที่สร้างขึ้น ซึ่งที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการวิเคราะห์มิติในประเด็นปัญหาเกี่ยวกับเครื่องมือวัด ได้แก่ Steven [7] และ Chen et al. [8] ใช้การวิเคราะห์เชิงมิติเพื่อหาความผิดพลาดจากการวัดความเร็วการไหล โดยจำลองการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลที่ใช้หลักการความดันตกคร่อมวางตัวในแนวนอน ซึ่งมีตัวกลางเป็นของผสม เพื่อหาค่าชดเชยในการวัด ได้แก่ เครื่องมือวัดการไหลแบบเวนทูรี และแผ่นออริฟิส ตามลำดับ โดยใช้ทฤษฎีของบั๊กกิงแฮม (Buckingham Pi theorem) ในการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากมีตัวแปรที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนจำนวนมาก พบว่า สามารถใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์มิติแบบบั๊กกิงแฮมในการสร้างแบบจำลองได้ แต่ยังไม่มีการวิจัยขึ้นไหนทำการทดลองเกี่ยวกับการหาความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์เชิงมิติและการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบน้ำการประปาที่วัดด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก เพื่อหาค่าชดเชยจากการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ระยะเวลาพัสดริ่มและดาวนส์ตริ่มที่ระยะใด ๆ โดยเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าอ้างอิงที่ได้จากวิธีการชั่งน้ำหนักตามมาตรฐาน ISO 4185:1980

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่เสมือนจริงกับน้ำในระบบท่อประปา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 เพื่อหาค่าชดเชยให้กับเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ระยะอัฟสตรึมและระยะคาว์นสตรึมต่าง ๆ

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) และท่อในส่วนทดลองประกอบด้วยข้อต่อ แบบ Double elbow 45 องศา ขนาด 2.54 เซนติเมตร (1 นิ้ว) และ 5.18 เซนติเมตร (2 นิ้ว)

1.3.3 การไหลภายในท่อช่วงทดลองมีความเร็วเฉลี่ย 0.2, 0.5 และ 1 เมตรต่อวินาที และมีลักษณะการไหลเต็มท่อ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงมิติ การจำลองระบบท่อน้ำประปาที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง และหลักการประยุกต์ใช้

1.4.2 วิธีใช้เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดวัดเวลาส่งผ่านแบบยึดติดหัววัดกับผิวท่อภายนอก และศึกษามาตรฐาน ISO 4185

1.4.3 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการวิเคราะห์เชิงมิติและการจำลองแบบ

1.4.4 ออกแบบชุดทดลองวัดความเร็วการไหลของน้ำ เพื่อให้ได้ลักษณะการไหลเสมือนจริง

1.4.5 เปรียบเทียบค่าความเร็วที่ได้จากวิธีซึ่งน้ำหนักและเครื่องมือวัดเพื่อคำนวณหาค่าชดเชย

1.4.6 ดำเนินการทดลองตามวิธีการศึกษา

1.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ได้แบบจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่เสมือนจริงกับน้ำในระบบท่อประปา

1.5.2 ได้ค่าชดเชยให้กับเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ระยะอัฟสตรึมและระยะคาว์นสตรึมต่าง ๆ

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท คือ โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การวิเคราะห์มิติและการสร้างแบบจำลองเสมือนจริง ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนการวัดความเร็วการไหลแบบอัลตราโซนิก ระบบท่อน้ำการประปา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์มิติเครื่องมือวัดการไหล

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์มิติของระบบสูบน้ำประปา การสร้างแบบจำลอง การสร้างชุดทดลอง การทดสอบการทำงานของชุดทดลอง การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ และการทวนสอบสมการพยากรณ์ต้นแบบ

บทที่ 4 กล่าวถึงความถูกต้องและเที่ยงตรงของการวัดการไหลด้วยเครื่องมือวัด การทวนสอบความเป็นไปได้ในการใช้สมการพยากรณ์ต้นแบบ การวิเคราะห์และกำหนดขอบเขตการใช้งานสมการพยากรณ์ต้นแบบ เพื่อนำไปทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของระบบท่อน้ำประปาที่ขนาดท่อต่าง ๆ

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 การวิเคราะห์เชิงมิติและสภาพเสมือนจริง

การวิเคราะห์เชิงมิติเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษามิติของปริมาณต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการความสัมพันธ์ทางกายภาพของสมการใด ๆ ซึ่งปริมาณของตัวแปรต่าง ๆ จะมีมิติที่เท่ากัน การวิเคราะห์มิติเป็นการลดขนาดชุดทดลอง ประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถหาคำตอบบางส่วนของปัญหาได้ทุกชนิด แต่คำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ไม่สมบูรณ์ จำเป็นต้องทำควบคู่กับการทดลอง เพื่อได้มาซึ่งคำตอบของปัญหา โดยวิธีบักกิงแฮมเป็นวิธีที่ใช้สำหรับการจัดกลุ่มตัวแปรในงานที่มีจำนวนตัวแปรมาก ซึ่งติดอยู่ในรูปกลุ่มตัวแปรอิสระ (π) [9]

2.1.1 หน่วยและมิติ

มิติ คือ มโนทัศน์พื้นฐานด้านการวัด เช่น ความยาว เวลา มวล และอุณหภูมิ เป็นต้น โดยมิติพื้นฐาน ได้แก่ มวล (M) ความยาว (L) เวลา (T) และ แรง (F) มีหน่วยแสดงขนาดของมิติ ได้แก่ กิโลกรัม เมตร วินาที และนิวตัน ตามลำดับ ตัวอย่างสัญลักษณ์ตัวแปร ชื่อตัวแปร มิติ และหน่วยพื้นฐานในด้านของไหลแสดงดังตารางที่ 2.1 [9]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างมิติและหน่วยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับของไหล

ตัวแปร	ชื่อตัวแปร	มิติ	หน่วย
q_m	อัตราการไหลเชิงมวล	MT^{-1}	$kg \cdot s^{-1}$
q_v	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	L^3T^{-1}	$m^3 \cdot s^{-1}$
v	ความเร็ว	LT^{-1}	$m \cdot s^{-1}$
m	มวล	M	kg
V	ปริมาตร	L^3	m^3
t	เวลา	T	s
ρ	ความหนาแน่น	ML^{-3}	$kg \cdot m^{-3}$
L	ความยาว	L	m
μ	ความหนืด	$ML^{-1}T^{-1}$	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
g	ความเร่งโน้มถ่วง	LT^{-2}	$m \cdot s^{-2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การวิเคราะห์มิติ

การวิเคราะห์มิติ เป็นการนำมิติของตัวแปรมาวิเคราะห์และจัดกลุ่ม โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีเรย์เลย์ห์ (Rayleigh method) และ วิธีบักกิงแฮม ซึ่งวิธีบักกิงแฮมสามารถจัดกลุ่มตัวแปรได้น้อยกว่าทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เพื่อได้มาซึ่งสมการพยากรณ์ โดยขั้นตอนในการใช้ วิธีบักกิงแฮม ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- 1) กำหนดตัวแปรและมิติทั้งหมดที่มีผลต่อการวัดอัตราการไหลที่คลาดเคลื่อน (จำนวน n ตัวแปร)
- 2) กำหนดมิติปฐมภูมิ M, L, T หรือ F, L, T
- 3) เลือกจำนวนตัวแปรซ้ำ (m) จากตัวแปรทั้งหมด ให้ได้จำนวนเท่ากับจำนวนมิติปฐมภูมิ (r) โดยตัวแปรซ้ำนี้จะต้องมีมิติปฐมภูมิครบทุกตัว เพื่อหาค่าจำนวนตัวแปรไร้มิติ $n-m$ ตัวแปร
- 4) กำหนดสมการมิติ โดยรวมตัวแปรซ้ำกับตัวแปรตามให้กลายเป็นตัวแปรไร้มิติ ($n-m$ ตัวแปร) แก้สมการหา π และจัดให้อยู่ในรูปสมการที่ 2.1

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{(n-1)}) \quad (2.1)$$

- 5) ตรวจสอบความอิสระของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ

2.1.3 การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์พฤติกรรมการไหลของต้นแบบ (Prototype) ประกอบด้วย สมการต้นแบบ (สมการที่ 2.2)

$$\pi_{1p} = F(\pi_{2p}, \pi_{3p}, \dots, \pi_{(n-1)p}) \quad (2.2)$$

สมการของแบบจำลอง (Model) (สมการที่ 2.3)

$$\pi_{1m} = F(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \dots, \pi_{(n-1)m}) \quad (2.3)$$

และนำสมการที่ 2.2 เท่ากับสมการที่ 2.3 เพื่อหาความสัมพันธ์ของสมการพยากรณ์ต้นแบบของตัวแปรตาม ดังสมการที่ 2.4 และของตัวแปรต้น ดังสมการ 2.5 ซึ่งใช้ในการสร้างแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\pi_{1m} = \pi_{1p} \quad (2.4)$$

$$\pi_{2m} = \pi_{2p}, \pi_{3m} = \pi_{3p}, \dots, \pi_{(n-1)m} = \pi_{(n-1)p} \quad (2.5)$$

2.2 เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน

เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่านมีการติดตั้ง 2 วิธี คือ ติดตั้งแบบตัววี (V-method) ซึ่งเหมาะกับท่อขนาดเล็ก และติดตั้งแบบแซด (Z-method) ซึ่งเหมาะกับท่อขนาดใหญ่ โดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่านเหมาะสำหรับวัดการไหลของไหลที่ไม่มีสารแขวนลอยปะปน ทำงานโดยอาศัยหลักการวัดเวลาที่แตกต่างของการส่งคลื่นอัลตราโซนิกจากอพัสตรัมทรานสดิวเซอร์ ไปยังดาว์นสตรัมทรานสดิวเซอร์ เปรียบเทียบกับการส่งคลื่นกลับมาในเส้นทางเดิมแต่ทิศทางตรงกันข้ามผ่านการหักเหและสะท้อนผนังท่อและของเหลว และนำเวลาที่แตกต่างกันระหว่างเวลาส่งผ่านตามการไหลและทวนการไหลมาคำนวณเป็นอัตราไหลเชิงปริมาตรและความเร็วของของไหล ดังรูปที่ 2.1 ข้อดีของเครื่องมือวัดชนิดนี้คือ เป็นการวัดแบบไม่ทำลาย ไม่ขวางการไหล ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างความดัน สามารถใช้ได้ใญานอุณหภูมิกว้าง และใช้พื้นที่ในการติดตั้งไม่มาก [10]

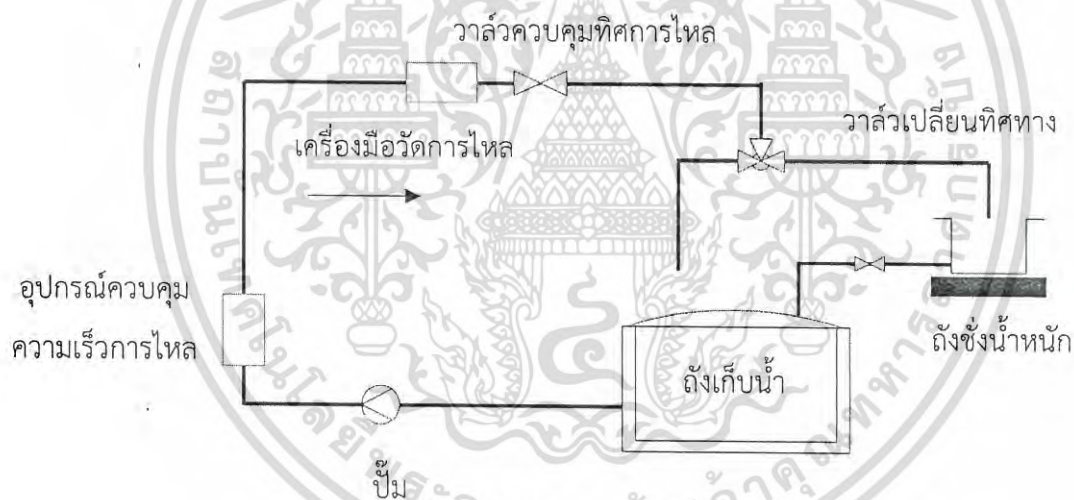


รูปที่ 2.1 เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่านติดตั้งแบบวี [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 มาตรฐาน ISO 4185:1980

มาตรฐาน ISO 4185 เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดที่วัดของเหลวในระบบปิด วิธีนี้ใช้การทวนสอบอัตราการไหลเชิงมวล อัตราการไหลเชิงปริมาตร และความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด โดยหลักการของมาตรฐานนี้ใช้การชั่งน้ำหนักในช่วงเวลาหนึ่ง ก่อนที่จะคำนวณไปเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร และความเร็ว โดยใช้คุณสมบัติของของเหลว และนำข้อมูลที่ได้จากการชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดที่ต้องการสอบเทียบเพื่อหาความคลาดเคลื่อน ซึ่งอุปกรณ์การทวนสอบ ประกอบด้วย ปัม อุปกรณ์ควบคุมความเร็วการไหล (Flow stabilizer) เครื่องมือวัดการไหล วาล์วควบคุมการไหล (Flow control valve) วาล์วควบคุมทิศทางการไหล (Diverter valve) ถังชั่งน้ำหนัก และถังเก็บน้ำ ดังรูปที่ 2.2 โดยวิธีนี้ไม่เหมาะกับของเหลวที่มีความดันไอสูง กัดกร่อน และเป็นพิษ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องในการสอบเทียบเครื่องมือวัด ซึ่งอัตราการไหลเชิงปริมาตรอยู่ในช่วง 0-1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และจำเป็นต้องไล่อากาศก่อนเริ่มปฏิบัติงาน [6]



รูปที่ 2.2 แผนภาพของการสอบเทียบเครื่องมือวัดการไหลโดยใช้มาตรฐาน ISO 4185 [6]

2.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนของการวัดการไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนของการวัดการไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ประกอบด้วย 3 ตัวแปรหลัก ได้แก่ คุณสมบัติของไหล ลักษณะท่อ และการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหล ซึ่งรายละเอียดของตัวแปรสามารถแจกแจงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 คุณสมบัติการไหล

คุณสมบัติการไหลเป็นคุณสมบัติที่ส่งผลโดยตรงต่อความคลาดเคลื่อนของการวัดอัตราการไหลด้วยเครื่องมือวัดอัลตราโซนิก โดยสามารถอธิบายได้จาก 2 ตัวแปรหลัก คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) และแนวเส้นความเร็ว (Velocity profile) ซึ่งตัวเลขเรย์โนลด์มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.6 แบ่งได้เป็น 2 ช่วงหลัก คือ การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน โดยแบ่งที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ 2,300 ในการช่วงการไหลแบบราบเรียบมีค่าน้อยกว่า 2,300 และการไหลปั่นป่วนมีค่ามากกว่า 2,300 [11]

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.6)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อ (เมตรต่อวินาที)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (เมตร)

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (ปาสคาลวินาที)

2.4.1.1 คุณสมบัติของไหล

ของไหลที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันส่งผลต่อตัวเลขเรย์โนลด์ในพจน์ความหนาแน่น และความหนืดสัมบูรณ์ และยังส่งผลถึงระยะทางเข้า (Entrance region) ที่มีผลต่อความถูกต้องของการวัดอัตราการไหล [4, 5]

2.4.1.2 อุณหภูมิของไหล

อุณหภูมิของไหลส่งผลต่อความเร็วเสียง โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกมากขึ้น เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิของของไหลสูงขึ้นจะส่งผลให้ความเร็วเสียงที่เดินทางในของไหลมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการวัดอัตราการไหล [12]

2.4.1.3 ความเร็วการไหล

ความเร็วการไหลส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการวัด เนื่องจากเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกวัดความเร็วเฉลี่ย ซึ่งแนวเส้นความเร็วที่ความเร็วต่ำจะมีความชันมากกว่าที่ความเร็วสูง จึงส่งผลให้เมื่อความเร็วการไหลมากขึ้นทำให้ความคลาดเคลื่อนจากการวัดน้อยลง [4]

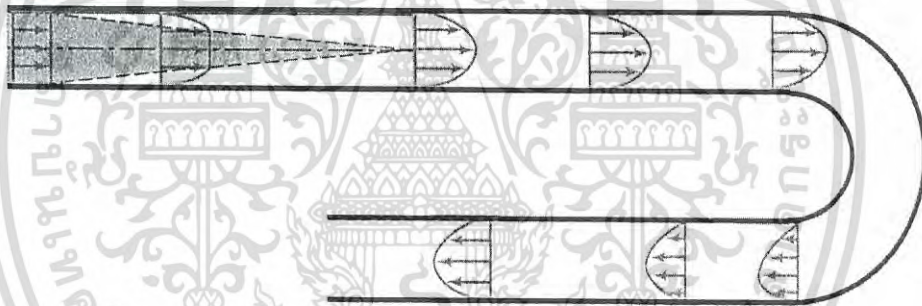
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.4 ระยะที่ได้รับผลกระทบจากตัวรับกวน

ระยะที่ได้รับผลกระทบจากตัวรับกวน คือ ระยะที่ของเหลวไหลผ่านตัวรับกวนต่าง ๆ เช่น ข้องอ 45 องศา ข้องอ 90 องศา และวาล์ว เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความดันแบบย่อย (Minor loss) เป็นเหตุให้ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดสูงขึ้น เนื่องจากการไหลยังมีการเปลี่ยนแปลงแนวเส้นความเร็วที่ไม่สมบูรณ์ [5] ดังรูปที่ 2.3

โดยระยะที่ได้รับผลกระทบจากตัวรับกวนจะมีค่าน้อยกว่าระยะทางเข้า ซึ่งเป็นระยะที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการไหลแบบเต็มท่อ (Fully developed, L_e) โดยในงานวิจัยนี้เลือกระยะทางเข้าเป็นตัวแทนของระยะที่ได้รับผลกระทบจากตัวรับกวน ซึ่งในการไหลแบบปั่นป่วนสามารถคำนวณระยะทางเข้าได้ดังสมการที่ 2.7 [11]

$$L_e = 1.359D \text{Re}^{\frac{1}{4}} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.3 แนวเส้นความเร็วภายในท่อ [11]

2.4.2 ลักษณะท่อ

ลักษณะท่อเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณลักษณะการไหล และความถูกต้องของเครื่องมือวัดการไหล ซึ่งประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ วัสดุและความหนาท่อ และวัสดุและความหนาของตะกรัน

2.4.2.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อส่งผลต่อการวัดเวลาส่งผ่าน เนื่องจาก การไหลที่ขนาดท่อต่างกันมีแนวเส้นความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าเวลาส่งผ่านที่นำไปคำนวณเป็นความเร็วแตกต่างกัน พบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนจากการวัดน้อยลง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 วัสดุและความหนาท่อ

วัสดุและความหนาท่อเป็นตัวแปรที่มีผลต่อระยะเวลาส่งผ่าน โดยสามารถอธิบายได้จากความเร็วของเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ต่างชนิดกัน ทั้งนี้ความเร็วเสียงขึ้นอยู่กับโมดูลัสของแรงบีบอัด (Bulk modulus) และความหนาแน่นของตัวกลาง [13]

2.4.2.3 วัสดุและความหนาของตะกรัน

การไหลในระบบปิดอย่างต่อเนื่องจะเกิดตะกรันขึ้นที่พื้นผิวท่อภายใน โดยตะกรันประเภทนี้เป็นประเภทพาทิคูเลท (Particulate fouling) โดยตะกรันหลักที่เกิดขึ้นในระบบการไหลของน้ำประปา คือ ตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นหลัก ตะกรันประเภทนี้มีส่วนประกอบหลักเป็นของแข็ง ซึ่งมีความเร็วเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านตะกรันประมาณ 2,260 เมตรต่อวินาที [13] ซึ่งความหนาของตะกรันที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เวลาส่งผ่านของเครื่องมือวัดแตกต่างกัน โดยเมื่อเวลาผ่านไปความหนาของตะกรันจะคงที่ในระบบปิด สามารถอธิบายได้ด้วยความต้านทานตะกรัน (Fouling resistance, R_f) ที่พบว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ความต้านทานตะกรันจะคงที่และสามารถคำนวณความหนาของตะกรัน (X_f) [14] ได้จากความสัมพันธ์

$$X_f = R_f \lambda_f \quad (2.8)$$

โดย λ_f คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนต (2.19 W/mK)

$$R_f = R_f^* (1 - e^{-\beta t}) \quad (2.9)$$

โดย $\beta = \frac{1}{t_c}$ คือ ส่วนกลับของเวลาที่เข้าสู่สมดุล

t_c คือ เวลาที่ตะกรันเริ่มเข้าสู่สมดุล โดยความต้านทานของตะกรันขึ้นอยู่กับค่ากำกับเชิงเส้นของความต้านทานตะกรัน (The asymptotic fouling resistance, R_f^*) [15] ที่หาได้จากความสัมพันธ์

$$R_f^* = 0.101 / (v^{1.33} D^{0.23}) \quad (2.10)$$

โดย v คือ ความเร็วของไหลในท่อ (เมตรต่อวินาที)

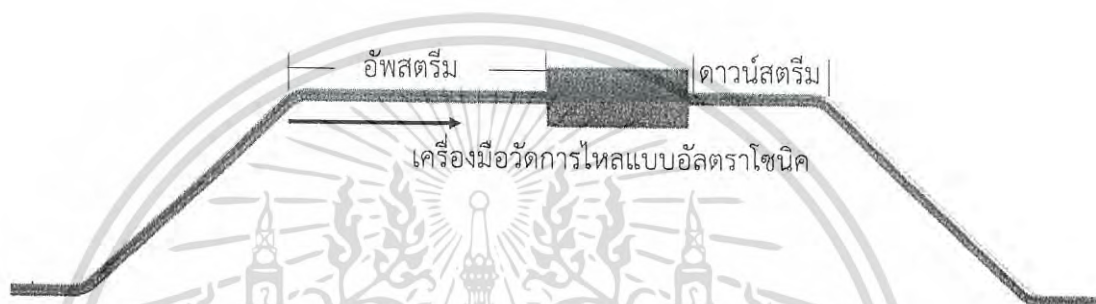
D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของท่อและตะกรันจัดอยู่ในรูปของแข็ง เมื่อของแข็งที่ความหนาแน่นสูงจะส่งผลให้ความเร็วเสียงมากขึ้น ทำให้การวัดเวลาส่งผ่านของเครื่องมือวัดน้อยลง [13]

2.4.3 การติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก

ระยะอัสตรีม และระยะดาว์นสตรีม (รูปที่ 2.4) เป็นระยะที่กำหนดเพื่อให้แนวเส้นความเร็วมีรูปแบบเต็มท่อ คือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแนวเส้นความเร็วการไหลเมื่อเวลาเปลี่ยนไป พบว่า เมื่ออัสตรีมและดาว์นสตรีมมากขึ้นส่งผลให้เครื่องมือวัดมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง [5]



รูปที่ 2.4 ระยะการติดตั้งของเครื่องมือวัดการไหล

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์มิติเครื่องมือวัดอัตราการไหล

Steven [7] ทำการวิเคราะห์มิติของไหล 2 สถานะ คือ ของเหลวและก๊าซที่วัดอัตราการไหลด้วยท่อเวนจูรีแนวนอนโดยใช้วิธีปักกิ่งแฮมเพื่อหาสมการพยากรณ์ แบบจำลอง และค่าชดเชยการวัดอัตราการไหลที่ผิดพลาด ซึ่งมีตัวแปรตามเป็นค่าความดันตกคร่อม และมีตัวแปรต้น 12 ตัวแปร ได้แก่ ความดันที่แตกต่างกัน อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สและของเหลว ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่น ความหนืดจลน์ของของเหลวและแก๊ส ความตึงผิวของของเหลว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเวนจูรี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ระยะส่วนบรรจบ (Length of the converging section) ระยะทางคอด (Length of the throat) ระยะกระจาย (Length of the diffuser section) ความขรุขระของผิว แรงโน้มถ่วง และความดันของระบบ ผลการทดลอง พบว่า การเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมจากเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบท่อเวนจูรีกับสมการพยากรณ์ไม่แตกต่างกับการวัดความดันตกคร่อมจากท่อเวนจูรีอย่างมีนัยสำคัญ

Chen et al. [8] หาค่าอัตราการไหลของแก๊สเปียกที่มากเกินไปจริงของเครื่องมือวัดการไหลแบบแผ่นออริฟิส ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่อัตราส่วนของของเหลวต่ำกว่าร้อยละ 0.5 โดยใช้เทคนิคการเอกสาร์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์มิติและสภาพเสมือนจริงวิธีบั๊กกิงแฮม เพื่อให้ได้คุณลักษณะการไหลเหมือนกับต้นแบบ โดยการวิเคราะห์มิติ ประกอบด้วย ตัวแปรตามเป็นค่าที่อ่านเกินจริงจากการวัด (Over reading) และตัวแปรต้น 9 ตัวแปร ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความดันของระบบ ความดันที่แตกต่างของแผ่นออริฟิส ความดันที่สูญเสีย อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว ความหนาแน่นแก๊ส ความหนาแน่นของเหลว ความหนืดจลน์ของแก๊ส ความหนืดจลน์ของของเหลว แรงตึงผิวของของเหลว และแรงโน้มถ่วง ในการย่อลงมาเหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กและใหญ่ (Beta ratio) เท่ากับ 0.55 โดยเปลี่ยนตัวกลางจากต้นแบบที่ใช้ น้ำมันและก๊าซ เป็นอากาศและน้ำแทน ซึ่งผลการทดลองพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของสมการจากวิเคราะห์มิติเมื่อเทียบกับผลการทดลองมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 2

Carlander and Delsing [16] ทดลองหาผลจากการติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ระยะต่าง ๆ ที่ติดตั้งแตกต่างกัน 5 แบบ ประกอบด้วย ท่อตรง (ชุดทดลองอ้างอิง) ข้องอด้านเดียว 90 องศา (Single elbow) ข้องอสองด้าน 90 องศา (Double elbow out of plane) การลดขนาดท่อ (Reduction in pipe diameter) และการไหลเป็นห้วง (Pulsating flow) โดยใช้ตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 10-100,000 เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากเครื่องมือวัด พบว่า ที่ท่อตรงตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 10-50, 50-500, 500-3,000 และ 3,000-100,000 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 28, 10, 3, และ 1 ตามลำดับ จะเห็นว่าอัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลง เนื่องจากแนวเส้นความเร็วที่อัตราการไหลสูงมีความชันที่น้อยกว่าความเร็วต่ำ จึงทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า

Tawackolian [12] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความถูกต้องของเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่านของโรงงานไฟฟ้า ในช่วงอุณหภูมิ 4-85 องศาเซลเซียส ในช่วงอัตราการไหลเชิงปริมาตร 50-900 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในการสอบเทียบเครื่องมือวัด จากการศึกษา พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกมากขึ้น เนื่องจากเกิดการขยายตัวเชิงความร้อน ทำให้คุณสมบัติของของไหลเปลี่ยนไป ได้แก่ ความหนาแน่น และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ จึงทำให้ความเร็วเสียงที่เดินทางในน้ำมีค่าสูงขึ้น จึงเกิดความคลาดเคลื่อนจากการวัดการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์มิติสำหรับการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบสูบน้ำจ่ายน้ำประปา เพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนของการวัดการไหลด้วยเครื่องมือวัดแบบอัลตราโซนิกที่ตำแหน่งการติดตั้งออสทริเมตรานสตีวเซอร์และดาวนส์ตริเมตรานสตีวเซอร์ในระยะต่าง ๆ โดยเนื้อหาประกอบด้วย การวิเคราะห์ระบบสูบน้ำจ่ายน้ำประปา การสร้างแบบจำลอง การสร้างชุดทดลอง การทดสอบการทำงานของชุดทดลอง การวัดความเร็วน้ำที่ไหลในชุดทดลองด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ระยะออสทริเมตรานสตีวเซอร์และดาวนส์ตริเมตรานสตีวเซอร์ต่าง ๆ เพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์และการทวนสอบสมการพยากรณ์ต้นแบบสำหรับการวัดความเร็วการไหลของน้ำด้วยท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5.08 เซนติเมตร

3.1 การสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบการประปานครหลวง

3.1.1 ระบบท่อน้ำการประปา

ระบบท่อน้ำการประปาเป็นระบบท่อขนาดใหญ่ที่มีน้ำไหลอย่างต่อเนื่อง ไม่สามารถหยุดการไหลได้ ซึ่งในกรณีที่มีสิ่งกีดขวางท่อน้ำประปา เช่น แม่น้ำ ลำคลอง หรือ ถนน เป็นต้น การวางตัวของท่อจึงจำเป็นต้องยกสูงขึ้นหรือฝังลงใต้ดินเพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางเหล่านั้น ซึ่งเครื่องมือวัดการไหลของน้ำที่นิยมใช้ในระบุดังกล่าว ได้แก่ เครื่องมือวัดการไหลโดยอาศัยหลักการวัดความดันแตกต่าง เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก และเครื่องมือวัดการไหลใช้หลักการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจากข้อมูลการประปา นครหลวง ใน พ.ศ. 2559 พบว่า มีการใช้งานเครื่องมือวัดประเภทดังกล่าวสำหรับการวัดความเร็วการไหลของน้ำภายในท่อประปาคิดเป็นร้อยละ 5.8 40.3 และ 53.9 ตามลำดับ ของจำนวนจุดวัดที่ขนาดท่อต่าง ๆ เห็นได้ว่าเครื่องมือวัดอาศัยหลักการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากมีการวัดที่เที่ยงตรงและแม่นยำ แต่ไม่สามารถวัดในท่อขนาดใหญ่ได้ ซึ่งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก มีจุดเด่นในย่านการวัดความเร็วและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่กว้างและเป็นการวัดแบบประกบ จึงเป็นที่นิยมในการวัดอัตราการไหลภายในระบบปิดที่มีขนาดใหญ่ โดยการติดตั้งเซนเซอร์ออสทริเมตรานสตีวเซอร์นั้น ขึ้นอยู่กับขนาดท่อ ซึ่งท่อขนาดใหญ่มักนิยมติดตั้งแบบแซด แต่ในกลุ่มท่อขนาดเล็กมักนิยมติดตั้งแบบวี เนื่องจากระยะการเดินทางของเสียงน้อยเกินไปที่จะ

ติดเซนเซอร์ด้านเดียวกัน จึงต้องอาศัยการสะท้อนของคลื่นเสียงที่ผนังท่อเพื่อเพิ่มระยะการเดินทาง

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของคลื่นเสียง จากการเก็บข้อมูล พบว่า ท่อที่วัดด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกมีจำนวนท่อทั้งหมด 62 ท่อ ประกอบด้วยท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100, 216, 267, 275, 320, 420, 500, 1,100, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000, 3,200 และ 3,400 มิลลิเมตร มีจำนวนจุดวัดที่ขนาดท่อต่าง ๆ เท่ากับ 2, 11, 1, 1, 1, 1, 1, 5, 3, 29, 3, 2, 1 และ 1 ท่อตามลำดับ ดังรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าขนาดท่อส่วนใหญ่ที่ใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก คือ ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,100 มิลลิเมตร ขึ้นไป เนื่องจากการวัดอัตราการไหลด้วยเครื่องมือวัดที่อาศัยหลักการวัดความดันแตกต่างและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นลักษณะการติดตั้งแบบภายในท่อ ซึ่งทำได้ยากในท่อขนาดใหญ่ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดแบบประกบ

โดยความเร็วน้ำของระบบประปาอยู่ในช่วง 0.2-1 เมตรต่อวินาที ซึ่งเมื่อคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100-3,400 มิลลิเมตร มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง 21,385-3,635,486 โดยคิดที่ความเร็วต่ำสุดของขนาดท่อเล็กสุด ถึงความเร็วสูงสุดของท่อขนาดใหญ่ และท่อส่วนใหญ่ทำจากเหล็กคาร์บอน (Carbon steel)



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (มิลลิเมตร) กับ จำนวนจุดวัดที่ขนาดท่อต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การวิเคราะห์มิติ

การวิเคราะห์มิติของระบบท่อน้ำประปาประกอบด้วยตัวแปรและมิติที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนของการวัดการไหลด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ติดตั้งแบบวี ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์มิติแบบบักกิงแฮมซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์มิติที่มีจำนวนตัวแปรมาก

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและมิติที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนของการวัดด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

ตัวแปร	สัญลักษณ์	มิติ
ตัวแปรตาม		
ความคลาดเคลื่อนจากการวัดอัตราการไหล	E	-
ตัวแปรต้น		
<u>ลักษณะท่อ</u>		
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของไหล	D	L
ความหนาแน่นของน้ำ	ρ	ML^{-3}
ความหนืดของน้ำ	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
ความเร็วเฉลี่ยของน้ำ	V	LT^{-1}
ระยะที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวนการติดตั้งเครื่องมือวัด	L_e	L
ระยะอัฟสตรีม	U_s	L
ระยะดาว์นสตรีม	D_s	L

ทั้งนี้ยังมีตัวแปรอีกหลายตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก ได้แก่ ความหนาของท่อ ชนิดของวัสดุทำท่อ ความหนาตะกรัน และชนิดตะกรัน ซึ่งไม่นำตัวแปรเหล่านี้มากำหนดเป็นตัวแปรต้นสำหรับการวิเคราะห์มิติในงานวิจัยนี้ เนื่องจากในการใช้งานเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกสามารถกำหนดค่าความหนาและคุณสมบัติของผิวด้านนอกจนถึงตัวของไหลได้ (Set offset) การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านตัวกลางจึงพิจารณาเฉพาะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

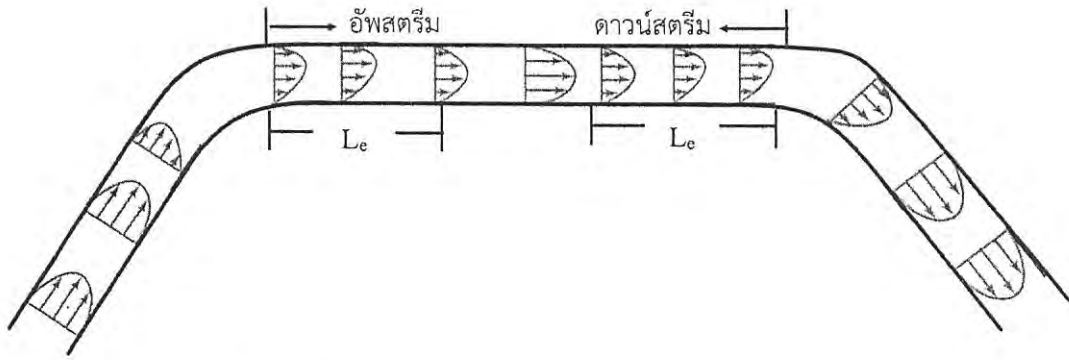
ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ผ่านของเหลวภายในท่อ ดังนั้น ในการวิเคราะห์มิติ จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดตัวแปรอื่น ๆ ที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่าน จากการวิเคราะห์มิติแบบ Buckingham สามารถจัดกลุ่มตัวแปรได้ 5 กลุ่ม $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$ และ π_5 ดังแสดงในสมการที่ 3.1 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก)

$$\left(\frac{E L_c}{D}\right) = F\left(\frac{\rho v D}{\mu}, \frac{L_c}{D}, \frac{U_s}{L_c}, \frac{D_s}{L_c}\right) \quad (3.1)$$

กลุ่ม $\pi_1 (EL_c/D)$ และ $\pi_3 (L_c/D)$ แสดงความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก ซึ่งประกอบด้วย 2 ตัวแปร ที่มีผลต่อการเกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุด ได้แก่ ระยะเวลาที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวน (L_c) คือ ระยะเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแนวเส้นความเร็วเนื่องจากตัวรบกวน (Disturbance) ที่ติดตั้งอยู่บริเวณทางเข้าและออกท่อตรง เช่น ข้อต่อ ข้องอ และวาล์ว เป็นต้น ดังรูปที่ 3.2 โดยระยะเวลาที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวนจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ทำให้ได้แนวเส้นความเร็วที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สมการการคำนวณระยะทางเข้าของการไหลแบบปั่นป่วน เนื่องจากระยะเวลาที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวนจะน้อยกว่าระยะทางเข้าเสมอ

กลุ่ม $\pi_2 (\rho v D/\mu)$ หรือตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่บ่งบอกถึงลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อ ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงสุด คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute viscosity) (μ) โดยของไหลที่มีค่าความหนืดสูงมักมีรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ ที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2,300 [11] และของไหลที่มีค่าความหนืดต่ำ เช่น น้ำ มักมีรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 2,300 สำหรับ

กลุ่ม $\pi_4 (U_s/L_c)$ และ $\pi_5 (D_s/L_c)$ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะอัฟสตรึมและดาวนัสตรึมกับระยะเวลาที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวน โดยการจัดกลุ่มตัวแปรนี้เนื่องจากระยะเวลาที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวนส่งผลต่อแนวเส้นความเร็วและความคลาดเคลื่อนของการวัดการไหลด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก เนื่องจากแนวเส้นความเร็วที่แตกต่างกันทำให้ความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระยะที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวน (L_c) และแนวเส้นการไหลภายในท่อ

3.1.3 การสร้างแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองระบบน้ำประปาที่ไหลในช่วงความเร็ว (v) 0.2-1 เมตรต่อวินาที และมีการไหลในสภาวะคงตัว (Steady flow) ซึ่งมีลักษณะการไหลภายในท่อแบบปั่นป่วน โดยท่อของระบบน้ำประปาทำจากเหล็กคาร์บอน วัดความเร็วด้วยการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกแบบประกบ ที่ระยะอัฟสตรีม (U_s) และดาว์สตรีม (D_s) ต่าง ๆ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มีขนาด 2.54 เซนติเมตร สำหรับสร้างแบบจำลอง โดยจำลองให้คุณลักษณะการไหลของน้ำภายในท่อมี่ลักษณะการไหลเหมือนของต้นแบบ (Prototype, P) โดยพิจารณาคุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 997.62 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนืดสัมบูรณ์เท่ากับ 0.000933 กิโลกรัมต่อเมตรวินาที ซึ่งความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปร แสดงดังสมการที่ 3.2 – 3.6

$$(E)_p = \frac{D_m^{0.25}}{D_p^{0.25}} (E)_m \quad (3.2)$$

$$(Re)_m = (Re)_p \quad (3.3)$$

$$L_{em} = \frac{D_p}{D_m} \times L_{ep} \quad (3.4)$$

$$U_{sm} = \frac{L_{em}}{L_{ep}} = \frac{D_m \times D_m^{0.25}}{D_p \times D_p^{0.25}} U_{fp} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{sm} = \frac{L_{cm}}{L_{cp}} = \frac{D_m \times D_m^{0.25}}{D_p \times D_p^{0.25}} D_{fp} \quad (3.6)$$

กลุ่มตัวแปรของต้นแบบและแบบจำลองกลุ่มที่ 1 (สมการที่ 3.2) ใช้สำหรับประเมินความคลาดเคลื่อนของค่าความเร็วที่วัดได้จากเครื่องมือวัดแบบอัลตราโซนิก โดยเป็นการคำนวณระยะทางเข้าของการไหลแบบปั่นป่วนเป็นตัวแทนของการคำนวณระยะที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.359 \times D \times Re^{0.25}$ (สมการที่ 2.7) จะเห็นได้ว่าการจำลองค่าความคลาดเคลื่อนนั้นขึ้นอยู่กับแค่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่านั้น สำหรับกลุ่มตัวแปรกลุ่มที่ 2 (สมการที่ 3.3) เป็นความสัมพันธ์ของตัวเลขเรย์โนลด์ที่บ่งบอกถึงคุณลักษณะการไหลของน้ำภายในท่อ โดยในการประเมินความคลาดเคลื่อนของค่าความเร็วที่วัดได้จากเครื่องมือวัดแบบอัลตราโซนิก ลักษณะการไหลของน้ำภายในท่อต้นแบบต้องเหมือนกับการไหลภายในท่อของแบบจำลอง นั่นหมายความว่า ตัวเลขเรย์โนลด์ของแบบจำลองต้องเท่ากับต้นแบบ

อย่างไรก็ตาม ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลของน้ำในระบบท่อการประปามีค่าที่สูงมากอยู่ในช่วง 21,385 ถึง 3,635,486 เนื่องจากน้ำมีความหนืดสัมบูรณ์สูง และระบบท่อมีขนาดใหญ่จึงทำให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่ามาก แม้ว่าจะมีความเร็วการไหลที่ต่ำก็ตาม ในขณะที่แบบจำลองซึ่งทำจากท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตรมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง 13,480 ถึง 54,318 ซึ่งในการสร้างแบบจำลองไม่สามารถทำให้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่อธิบายลักษณะการไหลของน้ำภายในท่อของแบบจำลองมีค่าเท่ากับตัวเลขเรย์โนลด์ของต้นแบบได้ เนื่องจากแบบจำลองต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่หรือความเร็วที่สูงมาก ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตามที่ผ่านมามีนักวิจัยทำการทดลองเกี่ยวกับการวัดการไหลด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก โดย Svensson [4] ได้ทดลองวัดการไหลของน้ำที่ความเร็วต่าง ๆ ภายในท่อด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน และอธิบายไว้ว่า หากลักษณะการไหลที่มีค่าเลขตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 10,000 มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ ± 5 จากอัตราการไหลจริง และมีแนวโน้มความคลาดเคลื่อนที่ลดลง เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 10,000 ทุกเงื่อนไข ซึ่งถือว่ามีคุณลักษณะการไหลที่ไม่ต่างกัน เนื่องจากในย่านความเร็วสูงช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะมีเส้นความเร็วการไหลจะเปลี่ยนแปลงน้อย สำหรับกลุ่มตัวแปรที่ 3 (สมการที่ 3.4) ใช้สำหรับหาระยะที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวนของแบบจำลอง โดยระยะที่ได้รับผลกระทบจากตัวรบกวนจะเปลี่ยนตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่งผลให้ได้แนวเส้นความเร็วที่แตกต่างกัน กลุ่มตัวแปรที่ 4 และ 5 (สมการที่ 3.5-3.6) ใช้สำหรับการระบุตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ฮัพ

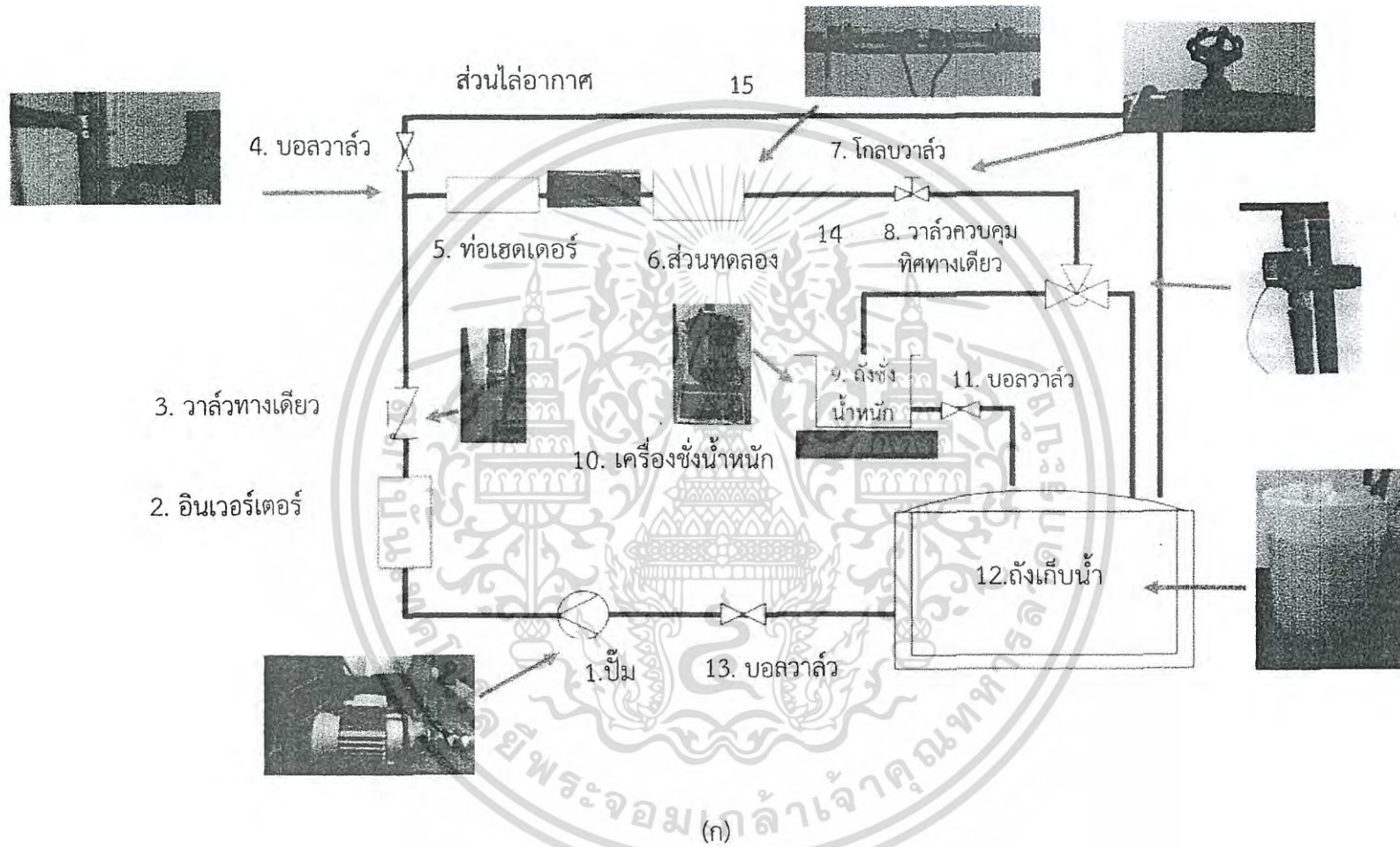
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สตรีมและดาวนสตรีมบนชุดทดลองที่สร้างขึ้น เพื่อนำไปหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งได้จากการทดลองที่แบบจำลอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนของต้นแบบพิจารณาจากความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรต้นแบบและแบบจำลองกลุ่มที่ 1 กับความคลาดเคลื่อนซึ่งได้จากการทดลองในแบบจำลอง

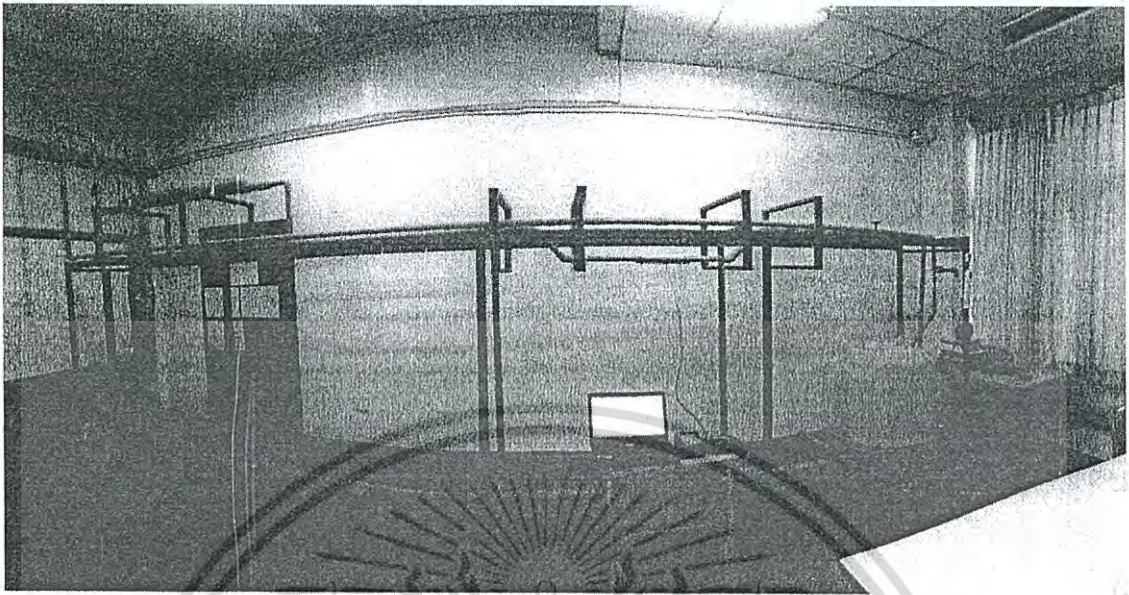
3.2 อุปกรณ์ทดลอง

3.2.1 การออกแบบชุดทดลอง

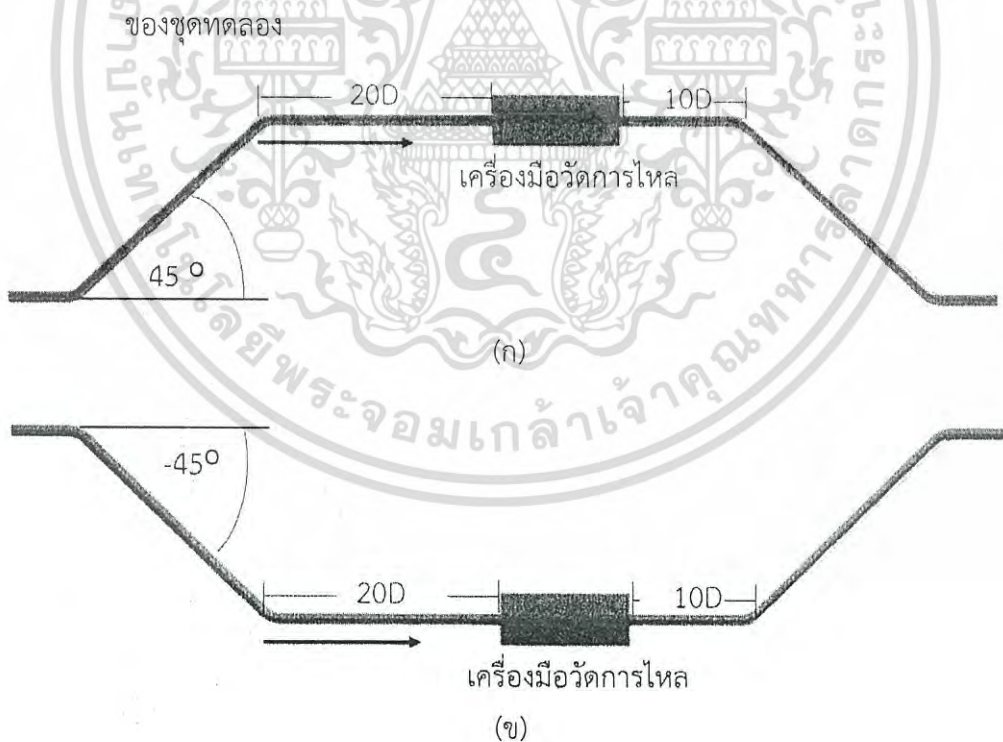
ชุดทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ร่วมกับงานวิจัยเรื่อง “ผลของการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิคที่มีต่อการวัดความเร็วน้ำในท่อ การจำลองด้วย CFD” ของนายพนชกร ศิริปริญญาพันธ์ รหัสนักศึกษา 59601301 นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยทำจากทำจากโพลีไวนิลคลอไรด์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.3 และตารางที่ 3.2 โดยส่วนทดลองประกอบด้วยข้อต่อ 45 องศา ในทิศทางการไหลขึ้นและลง ซึ่งเป็นตัวแทนของการเดินท่อขึ้นสะพานหรือฝั่งลงใต้ดิน ตามลำดับ และท่อตรงที่มีระยะอพัตรึมยาว 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (20D) และระยะดาวนสตรีมยาว 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (10D) แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ Fluid Components International (FCI)



รูปที่ 3.3 ระบบที่ใช้ในการทดลอง (ก) แผนภาพในการออกแบบตาม ISO 4185 (ข) ภาพจริงของชุดทดลอง



รูปที่ 3.3 (ต่อ) ระบบที่ใช้ในการทดลอง (ก) แผนภาพในการออกแบบตาม ISO 4185 (ข) ภาพจริง



รูปที่ 3.4 ส่วนทดลองประกอบด้วยข้อต่อ (ก) 45 องศาในทิศทางขึ้น (ข) 45 องศาในทิศทางลง และท่อตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์และส่วนประกอบของชุดทดลอง

หมายเลข	ส่วนประกอบของชุดทดลอง
1	ปั๊มแบบหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Mitsubishi Electric Automation WCM-1505T) ขนาด 2 แรงม้าและควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ ((Fuji Electric FA FRNO. 2C1S-7A))
2	อินเวอร์เตอร์ รุ่น sysdrive 3G3IV
3	วาล์วทางเดียวสำหรับท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร
4	บอลวาล์ว (Ball valve) สำหรับท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร
5	ท่อเฮดเดอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 10.16 เซนติเมตร (4 นิ้ว) ยาว 110 เซนติเมตร
6	เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก รุ่น Fuji Electric system co., Ltd. FSD220Y1
7	โกลบวาล์ว (Globe valve) สำหรับท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร
8	วาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหล (Diverter) สำหรับท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร (Nutork NTE - 20S DN 25 - B3)
9	ถังชั่งน้ำหนัก (Weighing tank) ปริมาตร 0.02 ลูกบาศก์เมตร ขนาด 18x26x45 เซนติเมตร
10	เครื่องชั่งน้ำหนักขนาด 30 กิโลกรัม ความละเอียด 1 กรัม ยี่ห้อ CST รุ่น CST: CDR-30
11	บอลวาล์วสำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร
12	ถังเก็บน้ำ (Sump) ขนาด 0.2 ลูกบาศก์เมตร
13	บอลวาล์วสำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร
14	ระบบท่อในส่วนทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 หรือ 5.08 เซนติเมตร
15	ระบบไล่อากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 2.54 เซนติเมตร

3.2.2 เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน คือ เครื่องมือวัดการไหลที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกหรือคลื่นเหนือเสียงในการตรวจจับความเร็วของของไหล โดยอาศัยความแตกต่างของเวลาที่คลื่นเหนือเสียงใช้ในการเคลื่อนที่ในทิศตามและทวนการไหล ซึ่งคลื่นเหนือเสียงที่ไหลตามการไหลของของไหลจะเร็วกว่าการไหลทวนของของไหล โดยรุ่นที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ รุ่น Fuji Electric system co., Ltd. FSD220Y1 ดังรูปที่ 3.5 ช่วงความเร็วการใช้งานอยู่ระหว่าง 0.3-32

เมตรต่อวินาที อุณหภูมิของไหล -40 ถึง 200 องศาเซลเซียส ขนาดท่อสำหรับวัดอัตราการไหล 13 ถึง 150 มม. ไม่จำกัดความดันการทำงานสูงสุดที่ 10 บาร์ เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่านนี้ มีข้อดีคือไม่ต้องสัมผัสกับของไหลที่วัด และไม่รบกวนการไหลของของไหล

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6,000 มิลลิเมตร ในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้งานอยู่ในช่วง 25-50 มิลลิเมตร โดยประมาณ มีความแม่นยำ เท่ากับ ± 0.03 เมตรต่อวินาที และความละเอียดเท่ากับ 0.001 เมตรต่อวินาที [2]



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 (ก) เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก รุ่น Fuji Electric system co., Ltd. FSD220Y1 และ (ข) เซนเซอร์อัลตราโซนิกและดาวนสตรีม

3.2.3 การทดลองเบื้องต้น

การทดลองเบื้องต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้สำหรับวิธีการหาค่าชดเชยเนื่องจากการวัดอัตราการไหลที่ไม่เหมาะสม โดยใช้ชุดทดลองที่ออกแบบดังอธิบายในหัวข้อที่ 3.2.1 และวัดความเร็วเฉลี่ยของน้ำด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก ที่ระยะอัลตราโซนิกและดาวนสตรีมที่แตกต่างกัน ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที เนื่องจากเป็นตัวแทนของความเร็วในช่วงที่เครื่องมือกำหนด

จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเมื่อระยะอัลตราโซนิกลดลงเนื่องจากระยะด้านทางเข้าไม่เพียงพอที่จะทำให้การไหลเข้าสู่ในช่วงการไหลเต็มท่อ และพบว่าเมื่อระยะดาวนสตรีมลดลงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากระยะดาวนสตรีมที่สั้นส่งผลให้การไหลย้อนกลับของกระแส ทำให้ค่าความเร็วที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง แต่เนื่องจากการเก็บข้อมูลในการทำ การทดลองเบื้องต้นเป็นการเก็บใส่การ์ดเอสดี เก็บข้อมูล 5 ครั้งต่อนาที ทำให้ข้อมูลบางส่วนมีค่าความคลาดเคลื่อนที่มากเกินความจริง จึงแก้ปัญหาโดยการต่อการวัดอัตราการไหลเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล เพื่อวัดแบบเวลาจริงที่ต่อเนื่อง ทำให้อัตราการเก็บข้อมูลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ข้อมูลน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมระบบก่อนเริ่มทดลอง

การเตรียมระบบเริ่มจากเปิดบอลวาล์วตำแหน่งที่ 13 ดังรูปที่ 3.3 เพื่อจ่ายน้ำขาเข้าของปั๊ม ซึ่งเป็นชนิดหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง พร้อมกับปิดบอลวาล์วตำแหน่งที่ 4 และเปิดโกลวาล์วตำแหน่งที่ 7 ของรูปที่ 3.3 เพื่อให้ น้ำไหลเข้าส่วนทดลอง ในขณะที่เดียวกันทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์จนได้ ความเร็วตามเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งความเร็วอ้างอิง คือ ค่าความเร็วที่ได้จากวิธีชั่งน้ำหนัก แต่ เนื่องจากช่วงแรกของการทดลอง ระบบยังคงมีอากาศค้างอยู่ในท่อ จึงมีความจำเป็นในการกำจัด อากาศ เพื่อเป็นไปตามข้อกำหนดของ ISO 4185 ซึ่งทำโดยการเปิดบอลวาล์วตำแหน่งที่ 4 เพื่อให้ น้ำ ขึ้นด้านบนที่สูงสุดของชุดทดลองก่อนที่จะไหลกลับเข้าสู่ถังเก็บน้ำตำแหน่งที่ 12 ดังเดิม ก่อนปิดบอล วาล์วตำแหน่งที่ 4 อีกครั้งเพื่อตรวจสอบอากาศในระบบ โดยสังเกตจากท่อไอที่อยู่ระหว่างท่อเสดเดอร์ ตำแหน่งที่ 5 กับส่วนทดลองหมายเลข 6 พร้อมทั้งตรวจสอบฟองอากาศของน้ำที่ไหลลงถังเก็บน้ำอีก ครั้ง ซึ่งหลังจากไล่อากาศและได้ความเร็วที่ต้องการ จะปล่อยให้ น้ำในระบบหมุนเวียนจนอยู่ในสภาวะ คงตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 - 45 นาที ก่อนเริ่มทำการทดลอง

3.3.2 การควบคุมความเร็วการไหลของน้ำ

การไหลของน้ำที่ความเร็ว 0.5 ในท่อขนาดท่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.08 เซนติเมตร และ 1 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดท่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.54 เซนติเมตร สามารถต่อไฟฟ้าสามเฟส เข้าปั๊มโดยตรง เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ไม่สามารถควบคุมการทำงานที่ความเร็วการไหลสูงได้ ส่วนที่ ความเร็วต่ำลงมาจำเป็นต้องควบคุมการไหลของน้ำด้วยอินเวอร์เตอร์ ดังนี้

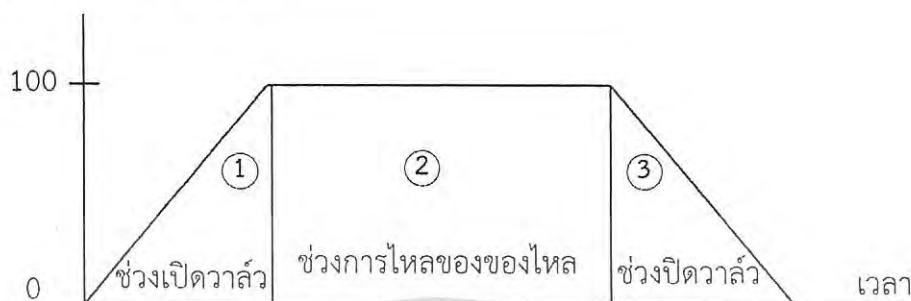
1. ความเร็วการไหล 0.2 และ 0.5 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร
2. ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาที ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร

3.3.3 ค่าปรับแก้ที่เกิดจากเวลาในการเปลี่ยนแปลงทิศทางของวาล์วควบคุมทิศทาง

เนื่องจากการเปลี่ยนเส้นทางการไหลโดยเปลี่ยนทิศทางของวาล์วควบคุมทิศทางมีเวลา ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ทำให้ได้มวลมากกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องปรับแก้มวลออกไปเพื่อค่าที่ ถูกต้อง โดยในกรณีที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นค่าชดเชยจะมากขึ้นตาม ซึ่งการทำงานของวาล์ว เปลี่ยนทิศทางประกอบด้วย 3 ขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่ ช่วงเปิดวาล์ว ช่วงการไหลของของไหล และช่วง ปิดวาล์ว ดังรูปที่ 3.6 โดยในการหามวลชดเชยนั้นจะเปิดวาล์วจนวาล์วสุดและปิดวาล์วทันทีเพื่อวัด

มวลที่สูญเสียในช่วงเปิดและปิดวาล์วเท่านั้น (พื้นที่ใต้กราฟ 1 และ 3) โดยทำการทดลองวัด 3 ครั้ง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ได้ผลการวัด ดังตารางที่ 3.4

ร้อยละของการเปิดวาล์ว



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทำงานของวาล์วเปลี่ยนทิศทาง

ตารางที่ 3.3 ค่ามวลลดเฉลี่ยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและความเร็วต่าง ๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เซนติเมตร)	ความเร็วอ้างอิง (เมตรต่อวินาที)	ค่าปรับแก้เฉลี่ย (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

3.3.4 การทดลอง

การทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด การหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ และการทวนสอบสมการพยากรณ์ต้นแบบ

3.3.4.1 การหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20D และระยะดาว์นสตรีม 10D มีมุมในการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ 75 องศา หรือห่างกัน 12.9 มิลลิเมตร ในแนวระดับ โดยตลอดระยะเวลาของการทดลองใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (Fluke 52 II Thermometer) วัดอุณหภูมิของน้ำ เพื่ออ้างอิงถึงค่าความหนาแน่นที่ถูกต้องที่ใช้คำนวณความเร็วการไหลเชิงเส้น โดยข้อมูลความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในภาคผนวก ข ซึ่งใช้วิธีการทดลองตามมาตรฐาน ISO 4185 ซึ่งในการทดลองจะเปลี่ยนเส้นทางการไหลของน้ำโดยวาล์วควบคุมทิศทางระหว่างถังน้ำ และถังชั่งน้ำหนัก เพื่อทำการชั่งน้ำหนักเป็นเวลา 10 วินาที เพื่อหาอัตราการไหลเชิงมวล ก่อนคำนวณกลับไปเป็นความเร็วโดยใช้คุณสมบัติของน้ำเพื่อเปรียบเทียบกับความเร็วที่ได้จากเครื่องมือวัดอัตราการไหล เพื่อเปรียบเทียบความเร็วที่ได้ระหว่างวิธีชั่งน้ำหนักกับความเร็วที่ได้จากเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก เพื่อคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) โดยการคำนวณความถูกต้อง และความเที่ยงตรงเป็นไปตามสมการ 3.1 - 3.4

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

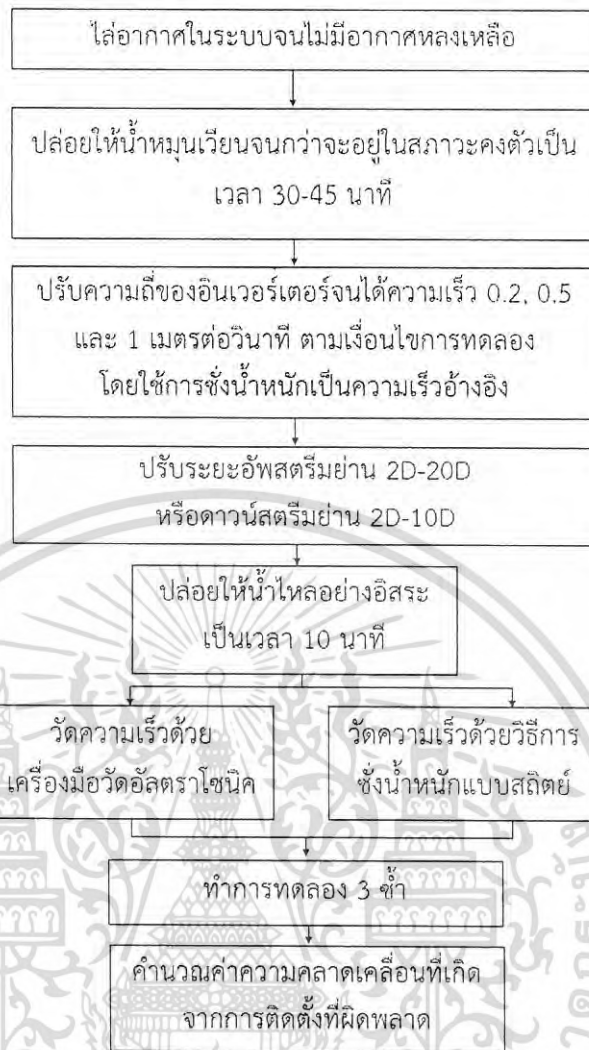
3.3.4.2 การหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ

การวางแผนการทดลองดำเนินการแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design; CRD) 4 ปัจจัย คือ ความเร็ว มี 3 ระดับ คือ 0.2, 0.5 และ 1 เมตรต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมี 2 ระดับ คือ 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ระยะก่อนการติดตั้งเครื่องมือวัดมี 10 ระดับ ระยะหลังการติดตั้งเครื่องมือวัด 5 ระดับ โดยเซนเซอร์ออปติคัลกับดาวนัสตรัมทำมุมกัน 75 องศา เนื่องจากหลังจากกระบวนการตั้งค่า โดยกำหนดค่าความหนาและคุณสมบัติของผิวด้านนอกจนถึงตัวของไหล ซึ่งได้แก่ ความหนาของท่อ ชนิดของวัสดุทำท่อ ความหนาตะก้น และชนิดตะก้น เครื่องมือวัดจะแนะนำระยะห่างระหว่างการเซนเซอร์ออปติคัลและดาวนัสตรัม นั่นคือ 12.9 มิลลิเมตร สำหรับท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร และ 33.1 มิลลิเมตร สำหรับท่อขนาด 5.08 เซนติเมตร ซึ่งมีการแจกแจงปัจจัยและช่วงการทดลองดังตารางที่ 3.5 ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองใช้เวลา 10 วินาที ในการวัดค่าความเร็วจากเครื่องมือวัดพร้อมกับซึ่งน้ำหนักของน้ำที่ไหลเข้าสู่ถังซึ่งน้ำหนัก และในการเก็บผลการทดลองแต่ละครั้งมีระยะห่างประมาณ 10 นาที เพื่อให้มั่นใจว่าการไหลกลับมาสู่สภาวะคงตัวอย่างสมบูรณ์ โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ เพื่อเก็บค่าความเร็วการไหลของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกเทียบกับการชั่งน้ำหนัก เพื่อหาความคลาดเคลื่อนความเร็ว โดยสามารถสรุปลำดับการเตรียมชุดทดลองและการทดลอง ได้ดังรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยและช่วงการทดลอง

ปัจจัย	ตัวแปร	ช่วงการทดลอง
1	ความเร็ว	0.2, 0.5 และ 1 เมตรต่อวินาที
2	เส้นผ่านศูนย์กลาง	1 และ 2 นิ้ว
3	ระยะออปติคัล	2D, 4D, 6D, 8D, 10D, 12D, 14D, 16D, 18D และ 20D
4	ระยะดาวนัสตรัม	2D, 4D, 6D, 8D และ 10D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ลำดับการเตรียมชุดทดลองและการทดลอง

3.3.4.3 การทวนสอบสมการพยากรณ์ต้นแบบ

ในการทวนสอบใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร เป็นตัวแทนต้นแบบ และใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของแบบจำลองในการทวนสอบ โดยขั้นตอนของการทวนสอบประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะอັพสตรีมหรือดาวน์สตรีมของต้นแบบ โดยหากพิจารณาระยะอັพสตรีมจะต้องกำหนดให้ระยะดาวน์สตรีมมากกว่า 10D และหากพิจารณาระยะดาวน์สตรีมจะต้องกำหนดให้ระยะอັพสตรีมมากกว่า 20 เท่า ตามข้อกำหนด FCI ก่อนจะนำข้อมูลของต้นแบบไปแทนในสมการระยะอັพสตรีมหรือดาวน์สตรีมที่สมการ 3.5 และ 3.6 เพื่อได้ตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัด และนำข้อมูลที่ได้ออกมาหาความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง เพื่อนำไปเทียบกับความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองของต้นแบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงความถูกต้องและเที่ยงตรงของการวัดความเร็วด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก ความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าความเร็วด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกซึ่งติดตั้งทรานสดิวเซอร์ในระยะอัสตริ่มและดาวน์สตรีมต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับความเร็วที่ได้จากวิธีการซึ่งน้ำหนักแบบสถิตย์ การทวนสอบความเป็นไปได้ในการใช้สมการพยากรณ์ต้นแบบในการทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดที่เกิดจากการใช้เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก โดยติดตั้งทรานสดิวเซอร์ในระยะอัสตริ่มและดาวน์สตรีมต่าง ๆ การวิเคราะห์และกำหนดขอบเขตการใช้งานสมการพยากรณ์ต้นแบบ เพื่อนำไปทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของระบบท่อน้ำประปาที่ขนาดท่อต่าง ๆ

4.1 ความถูกต้องและความเที่ยงตรงของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก

การทดสอบความถูกต้องและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน (Fuji Electric system co., Ltd. FSD220Y1) เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะของเครื่องมือวัดการไหลที่นำมาใช้ในการทดลอง โดยติดตั้งบริเวณท่อตรงระยะอัสตริ่มและดาวน์สตรีมเป็น 20 และ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (20D, 10D) ตามลำดับ ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ FCI [3] มุมที่ติดตั้งระหว่างเซนเซอร์ อัสตริ่มและดาวน์สตรีมมีค่าเท่ากับ 75 องศา โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วของน้ำอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ไหลอยู่ภายในท่อขนาด 2.54 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับการวัดความเร็วด้วยวิธีการซึ่งน้ำหนักแบบสถิตย์ จากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกสามารถวัดความเร็วโดยเฉลี่ยของน้ำที่ไหลภายในท่อได้เท่ากับ 0.490 เมตรต่อวินาที ในขณะที่ความเร็วจริงซึ่งวัดได้จากวิธีการซึ่งน้ำหนักแบบสถิตย์มีค่าเท่ากับ 0.498 เมตรต่อวินาที นั่นหมายความว่าเครื่องมือวัดการไหลนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 1.632 ค่าความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 98.368 และความเที่ยงตรงเท่ากับร้อยละ 2 คิดเป็นความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.01 เมตรต่อวินาที ซึ่งต่ำกว่า 0.03-0.05 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ผู้ผลิตรับไว้ จึงสามารถสรุปได้ว่า เครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกเครื่องนี้สามารถใช้สำหรับวัดความเร็วในการทดลองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความคลาดเคลื่อนของความเร็วน้ำในท่อโดยติดตั้งเซนเซอร์ที่ระยะอัฟสตรึมและดาว์นสตรึมต่าง ๆ

การหาค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วน้ำในท่อด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ติดตั้งเซนเซอร์ในตำแหน่งต่าง ๆ ดังนี้ ระยะอัฟสตรึม 2D, 4D, 6D, 8D, 10D, 12D, 14D, 16D, 18D และ 20D และระยะดาว์นสตรึม 2D, 4D, 6D, 8D และ 10D จำเป็นต้องพิจารณา ระยะอัฟสตรึมหรือดาว์นสตรึมเพียงด้านเดียว โดยหากพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ในระยะอัฟสตรึมต่าง ๆ จะต้องกำหนดระยะดาว์นสตรึมให้มากกว่าหรือเท่ากับ 10D ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการติดตั้งเซนเซอร์ในระยะดาว์นสตรึมต่าง ๆ จะต้องกำหนดระยะอัฟสตรึมให้มากกว่าหรือเท่ากับ 20D ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ FCI [3] ที่กำหนดว่าควรมีระยะอัฟสตรึมมากกว่า 20D และควรมีระยะดาว์นสตรึมมากกว่า 10D โดยค่าความเร็วเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดความเร็วน้ำที่ไหลภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกกับความเร็วที่คำนวณได้จากวิธีการซังน้ำหนักแบบสถิตย์ แสดงดังตารางที่ 4.1-4.5 และความคลาดเคลื่อนที่เปรียบเทียบระหว่างความเร็วที่ได้จากเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกกับความเร็วที่คำนวณได้จากวิธีการซังน้ำหนักแบบสถิตย์ แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาทีในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาทีในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 1.0 เมตรต่อวินาทีในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร

ระยะเวลาติดตั้ง	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)			
	1.0 เมตรต่อวินาที ในทิศทางขึ้น		1.0 เมตรต่อวินาที ในทิศทางลง	
	เครื่องมือวัด	ความเร็วอ้างอิง	เครื่องมือวัด	ความเร็วอ้างอิง
ระยะอัฟสตรีม				
20D	0.929±0.012	0.966±0.003	0.991±0.013	0.962±0.013
18D	0.923±0.009	0.970±0.001	0.988±0.011	0.933±0.012
16D	0.923±0.010	0.987±0.005	0.977±0.011	0.917±0.009
14D	0.918±0.009	0.981±0.007	0.971±0.010	0.903±0.013
12D	0.904±0.013	0.985±0.008	0.968±0.013	0.894±0.007
10D	0.839±0.009	0.974±0.014	0.968±0.014	0.887±0.004
8D	0.813±0.011	0.951±0.009	0.956±0.012	0.852±0.009
6D	0.810±0.011	0.956±0.015	0.947±0.013	0.844±0.010
ระยะดาวนสตรีม				
8D	0.928±0.013	0.974±0.012	0.995±0.010	0.940±0.005
6D	0.929±0.015	0.989±0.008	0.997±0.013	0.936±0.013
4D	0.927±0.010	0.981±0.007	0.965±0.011	0.901±0.008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ความเร็วการไหล 0.2 เมตรต่อวินาทีในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิคที่ความเร็วการไหล 0.5 เมตรต่อวินาทีในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการวัดความเร็วโดยเครื่องมือวัดการไหลที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เซนติเมตร)	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)	ทิศทาง	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ¹ (เปอร์เซ็นต์)														
			ระยะอัฟสตรีม ²									ระยะดาว์นสตรีม ³					
			2D	4D	6D	8D	10D	12D	14D	16D	18D	20D ⁴	10D ⁴	8D	6D	4D	2D
2.54	0.2	ขึ้น ⁵	- ⁷	-	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 ⁶	-	-	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	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

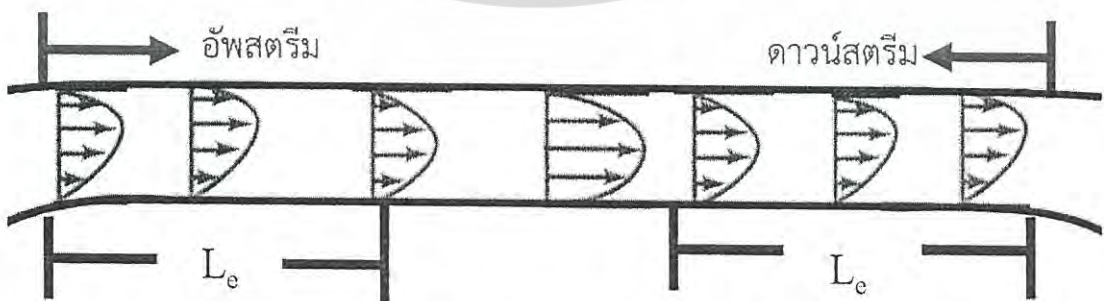
หมายเหตุ ¹ ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ² ติดตั้งที่ระยะดาว์นสตรีมถูกต้อง (10D) ³ ติดตั้งที่ระยะอัฟสตรีมถูกต้อง (20D) ⁴ ระยะการติดตั้งอ้างอิง

⁵ ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางขึ้น

⁶ ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางลง

⁷ "-" คือ ไม่สามารถวัดความเร็วได้

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น เมื่อระยะอัฟสตรึมลดลง เนื่องจากระยะอัฟสตรึมไม่เพียงพอที่จะทำให้การไหลเข้าสู่ในช่วงการไหลเต็มท่อ เนื่องมาจากเกิดการสูญเสียความดันที่บริเวณข้อต่อ 45 องศา ทำให้แนวเส้นความเร็วเกิดการเปลี่ยนแปลง [11] ดังรูปที่ 4.1 โดยทั่วไปในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะมีระยะทางเข้าเป็น $10D$ [11] ซึ่งมีระยะเพียงครึ่งหนึ่งของข้อกำหนดตาม FCI ทำให้เมื่อติดตั้งเซนเซอร์ในตำแหน่งที่มีระยะอัฟสตรึมน้อยกว่า $10D$ จึงเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดความเร็ว และ พบว่า เมื่อระยะดาว์สตรึมต่ำกว่าข้อกำหนดจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากระยะดาว์สตรึมที่สั้นมากจนเกินไปจะทำให้เกิดการไหลย้อนกลับที่ด้านทานการไหลของกระแสการไหลเต็ม ประกอบกับเกิดการเปลี่ยนแปลงของแนวเส้นความเร็วในช่วงขาออกจากท่อตรง เนื่องจากการสูญเสียความดันที่บริเวณ 45 องศาเช่นเดียวกัน [11] ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ดังรูปที่ 4.1 และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง เนื่องจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงส่งผลให้แนวเส้นความเร็วมีความเร็วที่ใกล้เคียงกันมากกว่าที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ โดยการวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกเป็นการวัดความเร็วเฉลี่ย จึงทำให้ความเร็วที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน แต่แนวเส้นความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนเปลี่ยนแปลงน้อย ดังรูปที่ 4.2 ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนต่างกันไม่มาก ซึ่งสอดคล้องกับ Svensson [4] ที่ได้ทดลองวัดการไหลของน้ำที่ความเร็ว $0.2-14.1$ m/s ภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก $30-60.2$ มิลลิเมตร ด้วยเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดเวลาส่งผ่าน และอธิบายไว้ว่า หากลักษณะการไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ มากกว่า $10,000$ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ± 5 เปอร์เซ็นต์ จากอัตราการไหลจริง และมีแนวโน้มความคลาดเคลื่อนที่ลดลง เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า $10,000$ ทุกเงื่อนไข ซึ่งถือว่ามีคุณลักษณะการไหลที่ไม่ต่างกัน เนื่องจากในย่านค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงจะมีแนวเส้นความเร็วการไหลเปลี่ยนแปลงน้อย และจะเห็นได้ว่าที่ข้อต่อ 45 องศา ในทิศทางขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าข้อต่อ 45 องศาในทิศทางลง เพราะแนวเส้นความเร็วเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากกว่าการไหลผ่านข้อต่อ 45 องศา ในทิศทางลง



รูป 4.1 แนวเส้นความเร็วในส่วนท่อตรงหลังผ่านข้อต่อ 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.2 แนวเส้นความเร็วช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (ก) ตัวเลขเรย์โนลด์สูง และ (ข) ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ

ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วน้ำที่ไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร โดยติดตั้งเซนเซอร์ที่ระยะอัปสตรีมและดาว์นสตรีมต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.6 เป็นค่าความคลาดเคลื่อนจริงหรือค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ซึ่งได้จากการทดลองจริงกับชุดทดลองที่สร้างขึ้นตามหลักการของการวิเคราะห์มิติและการสร้างแบบจำลอง รวมถึงการวิเคราะห์สมการพாயกร์ตันแบบ โดยในหัวข้อการทวนสอบสมการพอยกร์ตันแบบ (หัวข้อที่ 4.3) ได้กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วน้ำที่ไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร (ตารางที่ 4.6) เป็นค่าความคลาดเคลื่อนจริง และนำไปใช้สำหรับการทำนายค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ซึ่งพิจารณาเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของต้นแบบ

นอกจากนี้ ยังสามารถพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วน้ำที่ไหลในท่อทั้งสองขนาด (ตารางที่ 4.6) เป็นค่าความคลาดเคลื่อนจริงได้ เพื่อใช้สำหรับการทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของท่อต้นแบบขนาดต่าง ๆ ซึ่งสามารถพิจารณาขอบเขตการใช้งานสมการพอยกร์ตันแบบสำหรับท่อขนาดท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร ได้ตั้งอธิบายในหัวข้อที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วด้วยเครื่องมือวัดซึ่งติดตั้งอยู่ในตำแหน่งของระยะอัปสตรีมและดาว์นสตรีมต่าง ๆ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลอง ที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อนำไปใช้สำหรับการทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วน้ำที่ไหลในท่อขนาดต่าง ๆ ที่ความเร็วต่าง ๆ ในตำแหน่งการติดตั้งต่าง ๆ ดังนั้น หากผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองไม่มีความน่าเชื่อถือเพียงพอ ค่าการทำนายที่ได้จะไม่น่าเชื่อถือด้วยเช่นกัน

4.3 การทวนสอบสมการพอยกร์ตันแบบ

การทวนสอบสมการพอยกร์ตันแบบ เป็นการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทำนายด้วยสมการพอยกร์ตันแบบกับค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองจริงจากแบบจำลอง โดยการทวนสอบในงานวิจัยนี้ เป็นการทวนสอบความคลาดเคลื่อนของการวัดความเร็วการไหลของน้ำ 0.2 และ 0.5 เมตรต่อวินาที ด้วยเครื่องมือวัดการไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งของการติดตั้งเซนเซอร์ที่ระยะอัฟสตรึมและดาว์นสตรึมต่าง ๆ โดยพิจารณาเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับต้นแบบ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้ได้จากทำนายด้วยสมการพยากรณ์ต้นแบบ โดยใช้ข้อมูลความคลาดเคลื่อนของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร เป็นส่วนของข้อมูลจริงซึ่งได้จากการทดลองจากแบบจำลอง โดยขั้นตอนของการทวนสอบประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) การกำหนดเงื่อนไขของต้นแบบ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D_p) และระยะอัฟสตรึมหรือดาว์นสตรึม (U_{sp} หรือ D_{sp}) โดยกำหนดระยะให้เป็นจำนวนเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
- 2) การคำนวณหาระยะอัฟสตรึมหรือดาว์นสตรึมของแบบจำลองด้วยความสัมพันธ์

$$U_{sm} = U_{fp} D_m D_m^{0.25} / D_p D_p^{0.25}$$
 (สมการที่ 3.5) หรือ

$$D_{sm} = D_{fp} D_m D_m^{0.25} / D_p D_p^{0.25}$$
 (สมการที่ 3.6)
- 3) การหาค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง (E_m) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ที่ระยะอัฟสตรึมหรือดาว์นสตรึมของแบบจำลอง (U_{sm} หรือ D_{sm}) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 2
- 4) การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของแบบต้นแบบโดยความสัมพันธ์

$$E_p = E_m D_m^{0.25} / D_p^{0.25}$$
 (สมการที่ 3.2)
- 5) การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่ได้จากสมการพยากรณ์ในขั้นตอนที่ 4 กับค่าความคลาดเคลื่อนจริง ซึ่งได้จากชุดทดลอง (ตารางที่ 4.6)

ตัวอย่างการคำนวณมีดังนี้

- 1) การกำหนดเงื่อนไขของต้นแบบ โดยพิจารณาการไหลของน้ำในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ในทิศทางขึ้น 45 องศา ที่ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ระยะอัฟสตรึมเท่ากับ 15D การคำนวณหาระยะอัฟสตรึมด้วยความสัมพันธ์ (สมการที่ 3.5)

$$U_{sm} = 15 \times 2 \times D \times 1 \times 1^{0.25} / 2 \times 2^{0.25} = 12.6D$$
- 2) การหาค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง (2.54 เซนติเมตร) (E_m) จากตารางที่ 4.6 ที่ระยะอัฟสตรึม 12.6D มีค่าเท่ากับ 15.6
- 3) การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของแบบต้นแบบโดยความสัมพันธ์

$$E_p = 15.6 \times (1^{0.25} / 2^{0.25}) = 13.1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่ได้จากสมการพยากรณ์ต้นแบบจากขั้นตอนที่ 4 มีค่าเท่ากับ 13.1 กับ ค่าความคลาดเคลื่อนจริง ที่มีค่าเท่ากับ 8 ซึ่งผลต่างของร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการพยากรณ์ต้นแบบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากชุดทดลอง มีค่าเท่ากับ 5.1

โดยผลของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากสมการพยากรณ์ต้นแบบและค่าความคลาดเคลื่อนจริงที่ได้จากแบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 4.7 และผลต่างของค่าความคลาดเคลื่อนจากสมการพยากรณ์ต้นแบบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากชุดทดลองสามารถแสดงดังตารางที่ 4.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ได้จากสมการพยากรณ์ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากชุดทดลอง ที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)	ทิศทางการไหล	ระยะอัฟสตรีม ¹										ระยะดาว์สตรีม ²				
			2D	4D	6D	8D	10D	12D	14D	16D	18D	20D ³	10D ³	8D	6D	4D	2D
ชุดทดลอง ⁶	0.2	ขึ้น ⁴	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 ⁵	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
สมการพยากรณ์	0.2	ขึ้น	- ⁷	-	-	15.2	15.1	14.9	13.1	13.1	12.2	12.4	12.4	12.8	14.3	-	-
ต้นแบบ		ลง	-	-	-	16.4	15.3	15.2	13.1	12.8	14.4	12.1	12.1	12.8	11.3	-	-
$E_p = (E_m \times D_p^{0.25}) / D_m^{0.25}$	0.5	ขึ้น	-	-	-	13.9	13.7	12.7	10.8	9.2	8.7	7.3	7.3	12.8	14.3	-	-
		ลง	-	-	-	12.3	11.6	10.5	9.4	8.8	8.3	7.7	7.7	12.8	14.3	-	-

หมายเหตุ ¹ ติดตั้งที่ระยะดาว์สตรีมถูกต้อง (10D) ² ติดตั้งที่ระยะอัฟสตรีมถูกต้อง (20D) ³ ระยะการติดตั้งอ้างอิง ⁴ ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางขึ้น

⁵ ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางลง

⁶ ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ

⁷ "-" คือ ไม่สามารถคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนได้

ตารางที่ 4.8 ร้อยละค่าความแตกต่างระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ได้จากสมการพยากรณ์และคลาคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากชุดทดลอง

ความเร็ว (เมตรต่อ วินาที)	ทิศทางการ ไหล	ระยะอัฟสตรึม ¹										ระยะดาว์นสตรึม ²				
		2D	4D	6D	8D	10D	12D	14D	16D	18D	20D ³	10D ³	8D	6D	4D	2D
0.2	ขึ้น ⁴	- ⁶	-	-	2.7	2.4	6.2	5.1	8.4	9.7	10.4	12.4	12.8	14.3	-	-
	ลง ⁵	-	-	-	8.3	7.4	11.1	10	10.7	12.4	10.7	12.1	12.8	11.3	-	-
0.5	ขึ้น	-	-	-	10.7	11.3	11.1	8.9	8.4	8.3	6.9	7.3	12.8	14.3	-	-
	ลง	-	-	-	9.4	10	9.2	8.3	8.1	7.7	7.4	7.7	12.8	14.3	-	-

หมายเหตุ

¹ ติดตั้งที่ระยะดาว์นสตรึมถูกต้อง (10D)

² ติดตั้งที่ระยะอัฟสตรึมถูกต้อง (20D)

³ ระยะการติดตั้งอ้างอิง

⁴ ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางขึ้น

⁵ ข้อต่อ 45 องศาในทิศทางลง

⁶ "-" คือ ไม่สามารถคำนวณค่าความแตกต่างได้

พิจารณาผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทำนายด้วยสมการพยากรณ์ต้นแบบ กับค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองจริง พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับการวัดความเร็วการไหลของน้ำในท่อ 5.08 เซนติเมตร ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการพยากรณ์ต้นแบบโดยใช้ผลการทดลองจากแบบจำลอง ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวัดการไหลจริงในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร มีค่ามากขึ้นเมื่อระยะอัปสตรีมน้อยลง โดยสามารถแนะนำช่วงการทำนายของท่อแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ได้ในช่วงระยะอัปสตรีม 14D-20D และแนะนำการติดตั้งระยะดาวน์สตรีม 10D ซึ่งในกรณีแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ได้ในช่วงระยะอัปสตรีม 6D-20D และช่วงดาวน์สตรีม 4D-10D ซึ่งระยะอัปสตรีมและดาวน์สตรีมที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 10 [3] จะไม่นำมาพิจารณาที่จะใช้ในการกำหนดขอบเขตในหัวข้อ 4.4 และจากการทดลองพบว่าระยะอัปสตรีมที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะดาวน์สตรีม หากมีข้อจำกัดด้านการติดตั้ง ควรติดตั้งที่ระยะดาวน์สตรีมเท่ากับ 10D แต่หากระยะอัปสตรีมสั้นเกินไปจะส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ผิดพลาด

โดยที่ความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่มากกว่า เนื่องจากเป็นความเร็วที่ต่ำกว่าช่วงความเร็วที่เครื่องมือวัดแนะนำ ซึ่งแตกต่างกับที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที ที่ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า เนื่องจากเนื่องจากเป็นความเร็วที่อยู่ในช่วงการแนะนำของเครื่องมือวัด และจากการเปรียบเทียบผลต่างระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากสมการพยากรณ์ กับค่าความคลาดเคลื่อนจริง พบว่า ช่วงการแนะนำการใช้สมการพยากรณ์อยู่ที่ 14D และ 10D ทั้งนี้ความเร็วที่ใช้ควรอยู่ในช่วงที่เครื่องมือวัดการไหลแนะนำ

4.4 ขอบเขตการใช้งานสมการพยากรณ์ต้นแบบ

โดยทั่วไปสมการพยากรณ์ต้นแบบของเครื่องมือวัดการไหลนั้นมีข้อจำกัดในการใช้งานเสมอ โดยในการสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำในท่อ มีตัวแปรที่สำคัญและส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการวัดการไหลด้วยเครื่องมือวัด คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อต้นแบบ หัวข้อนี้อธิบายการเปรียบเทียบระหว่างการเลือกใช้ท่อขนาด 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของขนาดท่อในแบบจำลอง และพิจารณาขอบเขตที่สมการพยากรณ์ต้นแบบนี้สามารถใช้ทำนายความคลาดเคลื่อนได้ ขั้นตอนการพิจารณาขอบเขตการใช้งานของสมการพยากรณ์ต้นแบบ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) การกำหนดเงื่อนไขของต้นแบบประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของระบบการประปา (D_p) ที่มีขนาดต่าง ๆ และระยะอัดสตรึม (U_{sp}) ที่ระยะ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20D
- 2) การคำนวณหาระยะอัดสตรึมหรือดาว์นสตรึมของแบบจำลองด้วยความสัมพันธ์ $U_{sm} = U_{sp} D_m D_m^{0.25} / D_p D_p^{0.25}$ (สมการที่ 3.5) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของระบบการประปา (D_p) และระยะอัดสตรึม (U_{sp}) ตามขั้นตอนที่ 1
- 3) การเลือกช่วงข้อมูลที่มีระยะอัดสตรึมสูงกว่า 2D ยกเว้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของชุดทดลองและเครื่องมือวัด โดยขอบเขตระยะอัดสตรึมและดาว์นสตรึมของการใช้งานสมการพยากรณ์ต้นแบบ ในกรณีที่ใช้ท่อ 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของท่อต้นแบบ แสดงดังตารางที่ 4.9 และ 4.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ขอบเขตการใช้งานสมการพยากรณ์ต้นแบบของระยะอัฟสตรึม ในกรณีที่ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 และ 5.08 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของแบบจำลอง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ในแบบจำลอง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต้นแบบ (เซนติเมตร)	ระยะอัฟสตรึมของต้นแบบ ¹										
		2D	4D	6D	8D	10D	12D	14D	16D	18D	20D ²	
2.54 เซนติเมตร	5.08	3	-	-	-	-	-	-	-	-	15.14D	16.82D
	10.16	-	-	-	6.72D	8.41D	10.09D	11.77D	13.45D	15.14D	16.82D	
	25.4	-	-	-	-	6.69D	8.02D	9.36D	10.70D	12.04D	13.37D	
5.08 เซนติเมตร	127	-	-	-	-	-	-	6.26D	7.16D	8.05D	8.94D	
	254	-	-	-	-	-	-	-	6.02D	6.77D	7.52D	
	381	-	-	-	-	-	-	-	-	6.12D	6.80D	
หมายเหตุ	¹ ติดตั้งที่ระยะดาว์นสตรึมถูกต้อง (10D)			² ระยะการติดตั้งอ้างอิง			³ "-" ไม่สามารถใช้งานแบบจำลองได้					

ตารางที่ 4.10 ขอบเขตการใช้งานสมการพยากรณ์ต้นแบบของระยะดาวนัสตรีม ในกรณีที่ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของแบบจำลอง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อในแบบจำลอง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต้นแบบ (เซนติเมตร)	ระยะดาวนัสตรีมของต้นแบบ ¹				
		2D	4D	6D	8D	10D ²
5.08 เซนติเมตร	10.16	- ³	-	5.05D	6.73D	8.41D
	25.4	-	-	4.01D	5.34D	6.69D
	50.8	-	-	-	4.50D	5.62D

หมายเหตุ ¹ ติดตั้งที่ระยะอัปสตรีมถูกต้อง (10D) ² ระยะการติดตั้งอ้างอิง ³ “-” ไม่สามารถใช้งานแบบจำลองได้

จากผลการคำนวณ จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของแบบจำลอง สมการพยากรณ์ต้นแบบสามารถทำนายความคลาดเคลื่อนได้เฉพาะในช่วงระยะอัดสตรึม 18D-20D โดยสมการพยากรณ์ดังกล่าวสามารถทำนายท่อขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 5.08 เซนติเมตร เท่านั้น และไม่สามารถพยากรณ์ระยะตัววนสตรึมได้ เนื่องจากผลการทดลองที่ระยะตัววนสตรึมต่ำกว่า 10D มีค่าความคลาดเคลื่อนมาก จึงไม่แนะนำให้ใช้พยากรณ์ในช่วงดังกล่าว ในกรณีที่ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของแบบจำลอง สมการพยากรณ์ต้นแบบจะสามารถทำนายความคลาดเคลื่อนได้ในช่วงระยะอัดสตรึม 8D-20D โดยสมการพยากรณ์ดังกล่าวสามารถทำนายท่อขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 381 เซนติเมตร (150 นิ้ว) เนื่องจากข้อมูลความคลาดเคลื่อนที่ระยะอัดสตรึมมีช่วงข้อมูลกว้างขึ้น ทำให้ช่วงการทำนายของสมการพยากรณ์กว้างขึ้น และสมการทำนายความคลาดเคลื่อนได้ในช่วงระยะตัววนสตรึม 6D-10D โดยสมการพยากรณ์ดังกล่าวสามารถทำนายท่อขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 50.8 เซนติเมตร (20 นิ้ว)

จึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแบบจำลองจะทำให้ช่วงในการทำนายความคลาดเคลื่อนของท่อต้นแบบมากขึ้น และประกอบกับความถูกต้องของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่มีค่าสูงขึ้น เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น จึงทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายมีค่าถูกต้องมากขึ้นตามไปด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบสูบน้ำประปา เพื่อประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิก โดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์มิติด้วยวิธี Buckingham และ การสร้างสมการพยากรณ์ต้นแบบ ซึ่งตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์มิติ ประกอบด้วย ตัวแปรต้น คือ ลักษณะท่อ ของไหล และการติดตั้งเครื่องมือวัด และตัวแปรตาม คือ ความคลาดเคลื่อนจากการวัดการไหล สามารถจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ 5 กลุ่ม ดังนี้

$$E \frac{L_c}{D} = F\left(\frac{\rho v D}{\mu}, \frac{L_c}{D}, \frac{U_s}{L_c}, \frac{D_s}{L_c}\right)$$

สมการพยากรณ์ต้นแบบสำหรับประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด คือ

$$E_p = (E_m \times D_p^{0.25}) / D_m^{0.25}$$

ระยะการติดตั้งออสตรีมทรานสดิวเซอร์บนแบบจำลอง

$$U_{sm} = (D_m \times D_m^{0.25} \times U_{fp}) / (D_p \times D_p^{0.25})$$

ระยะการติดตั้งดาวนัสตรีมทรานสดิวเซอร์บนแบบจำลอง

$$D_{sm} = (D_m \times D_m^{0.25} \times D_{fp}) / (D_p \times D_p^{0.25})$$

จากผลการทดลอง พบว่า

- 1) เมื่อระยะออสตรีมและดาวนัสตรีมลดลง ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น
- 2) ช่วงแนะนำช่วงการทำนายของท่อแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ได้ในช่วงระยะออสตรีม 14D-20D และแนะนำการติดตั้งระยะดาวนัสตรีม 10D ซึ่งในกรณีแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ได้ในช่วงระยะออสตรีม 6D-20D และช่วงดาวนัสตรีม 4D-10D ซึ่งระยะออสตรีมและดาวนัสตรีมที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 10 จะไม่นำมาพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) จากระยะที่แนะนำในการทำนายข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างชุดทดลอง กับสมการพยากรณ์ต้นแบบ มีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่างร้อยละ 3-15 โดยหากใช้ท่อต้นแบบที่มีความเร็วและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงขึ้น จะส่งผลให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น

4) ในกรณีที่ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของแบบจำลอง สมการพยากรณ์ต้นแบบสามารถทำนายความคลาดเคลื่อนได้ในช่วงระยะอัปสตรีม 18D-20D โดยสมการพยากรณ์ดังกล่าวสามารถทำนายท่อขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 5.08 เซนติเมตร เท่านั้น และไม่สามารถพยากรณ์ระยะดาวน์สตรีมได้ ในขณะที่แบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร สมการพยากรณ์ต้นแบบจะสามารถทำนายได้ในช่วงระยะอัปสตรีม 8D-20D โดยสมการพยากรณ์ดังกล่าวสามารถทำนายท่อขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 381 เซนติเมตร ซึ่งสมการพยากรณ์ดาวน์สตรีมสามารถทำนายระยะที่ 6D-10D โดยสมการพยากรณ์ดังกล่าวสามารถทำนายท่อขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 50.8 เซนติเมตร ซึ่งการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางส่งผลให้ช่วงการทำนายของแบบจำลองกว้างขึ้น และความเร็วของการไหลควรอยู่ในช่วงที่เครื่องมือวัดกำหนด เพื่อความถูกต้องของสมการพยากรณ์มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของระบบสูบน้ำประปา เพื่อประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดการไหลแบบอัลตราโซนิกที่ระยะการติดตั้งต่าง ๆ โดยในระบบสูบน้ำประปายังมีอีกหลายปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดการไหล เช่น การวัดการไหลก่อนหรือหลังวาล์ว, ข้อต่อ 90 องศา ที่ระยะต่าง ๆ หรือการวัดการไหลที่ยังมีอากาศหลงเหลือในระบบ จึงควรเพิ่มปัจจัยดังกล่าวในการทดลอง และควรเพิ่มการศึกษาในช่วงความเร็วการไหลต่ำ เนื่องจากการไหลของระบบน้ำประปามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อใหญ่ที่มีความเร็วในการไหลต่ำ เพื่อให้การทดลองมีความใกล้เคียงกับระบบสูบน้ำประปามากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Baker, R. C. 2000. *Flow measurement handbook*. New York : Cambridge university press
- [2] Fuji Electric Co. 2000. *Instruction manual portable type ultrasonic flow meter (Portaflow C)*. Japan
- [3] Fluid Components International (FCI). 2007. , *Best Practices Engineering Guide*.
[Online] Available:. <http://www.fluidcomponents.com/assets/media/ManualsGuides/General/Best-Practices-Engineering-Guide-RevB.pdf>
- [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] International Standard ISO 4185. 1980. Switzerland : *Measurement of liquid flow in closed conduits-weighing method*.
- [7] Steven, R. 2008. “A dimensional analysis of two phase flow through a horizontally installed Venturi flow meter.,” *Flow Measurement and Instrumentation*. 19 : pp. 342-349.
- [8] 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 tural Gas Science and Engineering*. 32 : 390-394
- [9] Sonin, A. A. 2001. England: *The physical basis of dimensional analysis, Department of mechanical engineering*.
- [10] National Measure System (NEL). 2016. *An introduction to non-invasive ultrasonic flow metering*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Fox, R. W. McDonald, A.T. 1994. Introduction to fluid mechanics, School of mechanical engineering purdue university. New York
- [12] Tawackolian, K. Bükler, O. Hogendoorn, J. Lederer, T. 2013 “An Calibration of an ultrasonic flow meter for hot water.” Flow Measurement and Instrumentation. 30 : 166-173.
- [13] Rienstra, S.W. Hirschberg, A. 2016. An Introduction to Acoustics, Eindhoven University of Technology
- [14] Awad, M.M. 2011. “Fouling of Heat Transfer Surfaces.” Heat Transfer Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems. 505-542
- [15] Watkinson, A.p. 1980. “Process Heat Transfer: Some Practical Problems. ” , Can. J. Chem. Eng. 58 : 553-559.
- [16] Carlander C. and Delsing J. 2000. “Installation effects on an ultrasonic flow meter with implications for self diagnostics.”, Journal of flow measurement and instrumentation 11 : pp. 109-122



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการวิเคราะห์มิติแบบละเอียด

ขั้นตอนที่ 1

ตัวแปรและมิติทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการไหลที่ผลิตผลาดเป็นไปตามตาราง 3.1 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E = f(D, \rho, \mu, v, L_e, U_s, D_s) \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 2 เลือกใช้มิติปฐมภูมิ คือ M, L, T

ขั้นตอนที่ 3

กำหนดค่า m เพื่อหาค่าจำนวนตัวแปรไร้มิติ n-m ตัวแปร โดยมีจำนวนตัวแปรทั้งหมด 8 ตัว และจำนวนมิติทั้งหมด 3 ตัว ดังนั้นจำนวนของพายเท่ากับ $8-3 = 5$ ซึ่งให้ ρ, v และ D เป็นตัวแปรซ้ำ จัดให้อยู่ในรูปสมการที่ 2

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (2)$$

ขั้นตอนที่ 4

กำหนดสมการมิติ โดยรวมตัวแปรซ้ำกับตัวแปรตามให้กลายเป็นตัวแปรไร้มิติ (n-m ตัวแปร) ให้ได้สมการ และแก้สมการหา π พร้อมจัดให้อยู่ในรูปสมการที่ 3

$$\emptyset E^c D^c \rho^c \mu^c v^c L_e^c U_s^c D_s^c = 1 \quad (3)$$

โดย C คือ ค่าคงที่

$$\emptyset (1)^{c_1} (L)^{c_2} (ML^{-3})^{c_3} (ML^{-1}T^{-1})^{c_4} (LT^{-1})^{c_5} (L)^{c_6} (L)^{c_7} (L)^{c_8} = 1 = c(M^0 L^0 T^0) \quad (4)$$

สามารถจัดเลขยกกำลังได้ตั้งสมการ 5 6 และ 7

หาค่าคงที่

$$M : C_3 + C_4 = 0 \quad (5)$$

$$L : C_2 - 3C_3 - C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8 = 0 \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T : -C_4 - C_5 = 0 \quad (7)$$

จะเห็นได้ว่ามี 3 สมการ แต่มีตัวแปร 8 ตัวที่ไม่ทราบค่า จึงมีความจำเป็นในการกำหนดค่าคงที่เพื่อช่วยต่อการแก้สมการ

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์มิติกลุ่มพาย

1. วิเคราะห์มิติ π_1 $\pi_1 = \rho^{c_3} v^{c_5} D^{c_2} E$ (8)

$$\pi_1 = ((ML^{-3})^{c_3} (LT^{-1})^{c_5} (L)^{c_2} 1) = (M^0 L^0 D^0) \quad (9)$$

พิจารณามิติของมิติปฐมภูมิ แต่ละตัวดังนี้

ตัวแปร M : $c_3 = 0$ (10)

ตัวแปร L : $-3c_3 + c_5 + c_2 = 0$ (11)

ตัวแปร T : $-c_5 = 0$ (12)

แก้สมการได้ $c_3, c_5 = 0$ และ $c_2 = 0$

แทนค่า c_3, c_5 และ c_2 กลับไปในสมการ 8

ได้ $\pi_1 = E$

2. วิเคราะห์มิติ π_2 $\pi_2 = \rho^{c_3} v^{c_5} D^{c_2} \mu$ (13)

$$\pi_2 = ((ML^{-3})^{c_3} (LT^{-1})^{c_5} (L)^{c_2} ML^{-1} T^{-1}) = (M^0 L^0 D^0) \quad (14)$$

พิจารณามิติของมิติปฐมภูมิ แต่ละตัวดังนี้

ตัวแปร M : $c_3 + 1 = 0$ (15)

ตัวแปร L : $-3c_3 + c_5 + c_2 - 1 = 0$ (16)

ตัวแปร T : $-c_5 - 1 = 0$ (17)

แก้สมการได้ $c_3 = -1, c_5 = -1$ และ $c_2 = -1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า c_3 , c_5 และ c_2 กลับไปในสมการ 13

$$\text{ได้ } \pi_4 = \rho^{-1} v^{-1} D^{-1} \mu = \frac{\mu}{\rho v D}$$

3. วิเคราะห์มิติ π_3

$$\pi_3 = \rho^{c_5} v^{c_7} D^{c_2} L_e \quad (18)$$

$$\pi_3 = ((ML^{-3})^{c_5} (LT^{-1})^{c_7} (L)^{c_2} L) = (M^0 L^0 D^0) \quad (19)$$

พิจารณามิติของมิติปฐมภูมิ แต่ละตัวดังนี้

$$\text{ตัวแปร } M : c_5 = 0 \quad (20)$$

$$\text{ตัวแปร } L : -3c_5 + c_7 + c_2 + 1 = 0 \quad (21)$$

$$\text{ตัวแปร } T : -c_7 = 0 \quad (22)$$

แก้สมการได้ $c_5, c_7 = 0$ และ $c_2 = -1$

แทนค่า c_5 , c_7 และ c_2 กลับไปในสมการ 18

$$\text{ได้ } \pi_3 = D^{-1} L_e = \frac{L_e}{D}$$

4. วิเคราะห์มิติ π_4

$$\pi_4 = \rho^{c_5} v^{c_7} D^{c_2} U_s \quad (23)$$

$$\pi_4 = ((ML^{-3})^{c_5} (LT^{-1})^{c_7} (L)^{c_2} L) = (M^0 L^0 D^0) \quad (24)$$

พิจารณามิติของมิติปฐมภูมิ แต่ละตัวดังนี้

$$\text{ตัวแปร } M : c_5 = 0 \quad (25)$$

$$\text{ตัวแปร } L : -3c_5 + c_7 + c_2 + 1 = 0 \quad (26)$$

$$\text{ตัวแปร } T : -c_7 = 0 \quad (27)$$

แก้สมการได้ $c_5, c_7 = 0$ และ $c_2 = -1$

แทนค่า c_5 , c_7 และ c_2 กลับไปในสมการ 23

$$\text{ได้ } \pi_4 = D^{-1} U_s = \frac{U_s}{D}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วิเคราะห์มิติ π_5 $\pi_5 = \rho^{c_5} v^{c_7} D^{c_2} D_s$ (29)

$$\pi_5 = ((ML^{-3})^{c_5} (LT^{-1})^{c_7} (L)^{c_2} L) = (M^0 L^0 D^0) \quad (30)$$

พิจารณามิติของมิติปฐมภูมิ แต่ละตัวดังนี้

ตัวแปร M : $c_5 = 0$ (31)

ตัวแปร L : $-3c_5 + c_7 + c_2 + 1 = 0$ (32)

ตัวแปร T : $-c_7 = 0$ (33)

แก้สมการได้ $c_5, c_7 = 0$ และ $c_2 = -1$

แทนค่า c_5, c_7 และ c_2 กลับไปในสมการ 29

ได้ $\pi_5 = D^{-1} D_s = \frac{D_s}{D}$

แทนค่าพายกลับไปในสมการ 7

$$E = F\left(\frac{\mu}{\rho v D}, \frac{L_e}{D}, \frac{U_s}{D}, \frac{D_s}{D}\right) \quad (34)$$

และทำการจัดรูปกลุ่มพายเทอมเพื่อสอดคล้องกับความเป็นจริง

โดยนำ

$\pi_1 \times \pi_3 = E \frac{L_e}{D}$ แทนที่ π_1 เดิม

$\frac{1}{\pi_2} = \frac{\rho v D}{\mu}$ แทนที่ π_2 เดิม

$\frac{\pi_4}{\pi_3} = \frac{U_s}{L_e}$ แทนที่ π_4 เดิม

$\frac{\pi_5}{\pi_3} = \frac{D_s}{L_e}$ แทนที่ π_5 เดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถจัดกลุ่มพายเทอมใหม่ได้ดังนี้

$$E \frac{L_c}{D} = F\left(\frac{\rho v D}{\mu}, \frac{L_c}{D}, \frac{U_s}{L_c}, \frac{D_s}{L_c}\right) \quad (35)$$

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบความเป็นอิสระของตัวแปร

	E	D	ρ	μ	v	L_c	U_s	D_s
π_1	①	-1	0	0	0	1	0	0
π_2	0	-1	①	1	-1	0	0	0
π_3	0	-1	0	0	0	1	0	0
π_4	0	-1	0	0	0	0	①	0
π_5	0	-1	0	0	0	0	0	①

พบว่ากลุ่มพาย 1, 2, 3, 4 และ 5 มีค่าความอิสระของตัวแปรเท่ากับ 1 และกลุ่มพาย 2 มีค่าความอิสระของตัวแปรเท่ากับ -1 จะเห็นได้ว่าแต่ละกลุ่มตัวแปรมีความอิสระต่อกัน จึงสามารถนำมาใช้สร้างแบบจำลองได้

3.1.2 การสร้างแบบจำลอง

การออกแบบให้แบบจำลอง (Model, m) เท่ากับต้นแบบ (Prototype, P) โดยในการวิเคราะห์พิจารณาคุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 997.62 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนืดจลน์เท่ากับ 0.000933 กิโลกรัมต่อเมตรวินาที

1.พิจารณาตัวแปร π_1 (36)

$$\left(E \times \frac{L_c}{D}\right)_m = \left(E \times \frac{L_c}{D}\right)_p$$

แทนค่า $\frac{L_c}{D}$ จากสมการที่ (5)

$$\left(E \times \frac{1.359D \left(\frac{\rho v D}{\mu}\right)^{\frac{1}{4}}}{D}\right)_m = \left(E \times \frac{1.359D \left(\frac{\rho v D}{\mu}\right)^{\frac{1}{4}}}{D}\right)_p$$

พิจารณาที่ 27 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(E)_p = \frac{D_m^{0.25}}{D_p^{0.25}} (E)_m \quad (37)$$

2. พิจารณาตัวแปร π_2

$$\left(\frac{\mu}{\rho v D}\right)_m = \left(\frac{\mu}{\rho v D}\right)_p \quad (38)$$

$$(Re)_m = (Re)_p \quad (39)$$

3. พิจารณาตัวแปร π_3

$$\left(\frac{L_c}{D}\right)_m = \left(\frac{L_c}{D}\right)_p \quad (40)$$

$$L_{em} = \frac{D_p}{D_m} \times L_{ep} \text{ เมตร} \quad (41)$$

4. พิจารณาตัวแปร π_4

$$\left(\frac{U_s}{L_c}\right)_m = \left(\frac{U_s}{L_c}\right)_p \quad (42)$$

$$\left(\frac{U_s}{1.359D \left(\frac{\rho v D}{\mu}\right)_m^4}\right) = \left(\frac{U_s}{1.359D \left(\frac{\rho v D}{\mu}\right)_p^4}\right) \quad (43)$$

$$U_{sm} = \frac{D_m \times D_m^{0.25}}{D_p \times D_p^{0.25}} U_{fp} \quad (44)$$

5. พิจารณาตัวแปร π_5

$$\left(\frac{D_s}{L_c}\right)_m = \left(\frac{D_s}{L_c}\right)_p \quad (44)$$

$$D_{sm} = \frac{D_m \times D_m^{0.25}}{D_p \times D_p^{0.25}} D_{fp} \quad (45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

Lecture Notes in Engineering and Computer Science

IMECS 2017

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

Hong Kong
15-17 March, 2017



Similarity Model of MWA Thailand Water System for Error Estimation of Ultrasonic Flow Meter

R. Wachirapunyanont, V. Kongratana, S. Gulphanich, T. Suesut, and N. Nunak

Abstract— This paper proposed a similarity model of MWA water system using the dimensional analysis based on the theory of Buckingham Pi for error estimation of transit-time ultrasonic flow meter with clamp-on at different installation conditions. There were three main parameters groups, i.e., pipe characteristic, meter installation, and fluid characteristic and properties and could be arranged in five Pi terms, i.e., $E \times (L_c/D)$, $\mu/\rho vD$, L_c/D , U_s/D , and U_s/D . The results showed that the relative errors of measurement increased with the decreasing of upstream and downstream of meter at the same velocity and there was a possibility to use the model to determine the correction factor to compensate the velocity measurement of ultrasonic flow meter as the installation could not comply with the requirement. However, the further experiments should be performed for validation of the model predictive equation i.e., $E_p = 0.3607 \times E_m$.

Index Terms— Dimensional analysis, Ultrasonic flow meter, Error estimation

I. INTRODUCTION

A large closed water piping system, containing the continuous flow of water, e.g., the water system of the Metropolitan Waterworks Authority of Thailand (MWA), is difficult to use with inline measurement. There are many types of flow measurement devices, e.g., pressure difference meter, venturi meter, and nozzle meter which is difficult to repair and install, water flow is interrupted, and flow characteristic is changed.

Manuscript received December 21, 2016; revised January 09, 2017.

R. Wachirapunyanont is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Bangkok, 10520 Thailand (e-mail: Rattachot.bel@gmail.com).

V. Kongratana is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Bangkok, 10520 Thailand (email: viriva.ko@kmitl.ac.th)

S. Gulphanich is with department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (e-mail: suphan.gu@kmitl.ac.th).

T. Suesut is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Bangkok, 10520 Thailand (email: taweepol.su@kmitl.ac.th)

N. Nunak is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Bangkok, 10520 Thailand (corresponding author to provide phone: 66-2-329-8356; fax: 66-2-329-8357; e-mail: navaphattra.nu@kmitl.ac.th).

There is another in-line measurement, i.e., electromagnetic flow meter, which needs to install at the beginning of piping and installation system is available only in the small size of pipe diameter [1], whereas transit-time ultrasonic flow meter with clamp-on is a nonintrusive flow meter, which can be used any time and it is available in a wide range of pipe diameters.

The ultrasonic flow meter is a clamp on flow meter, which detects flow rate by transit-time measuring and is suitable for fluid with no particles i.e., water. Also, this instrument is one of the meters used in the MWA water system for measuring of water velocity during flowing in the pipe. However, the accuracy of the measurement is affected from many factors, e.g., internal diameter of the pipe, water velocity, and the upstream and downstream distance of clamped meter [3], [4], which is required the distance more than 20 times and 10 times of internal diameter, respectively [2]. In case of the MWA water system, there is limited installation space, which affects the error of measured velocity value. It is impossible to investigate the occurred error in the actual system; therefore, it is necessary to create a model of a large closed water piping system using the dimensional analysis under the flow characteristics and velocity profile similar to the prototype. Several researchers have studied about dimensional analysis in the point of view of flow measurement, e.g., Steven [5] studied dimensional analysis of two phase flow through a horizontally installed venturi flow meter, and Chen [6] used dimensional analysis for investigation wet gas over-reading in orifice plates under ultra-low liquid fraction conditions based on theory of Buckingham Pi (π) for flow simulation from prototype to model. Nowadays, there is no researcher studied about simulating model of the MWA water system for determination error of velocity value measured from ultrasonic flow meter with clamp on.

Therefore, this paper presents a similarity model of the MWA water system using the dimensional analysis based on the theory of Buckingham Pi for determining relative error between velocity value obtained from the transit time ultrasonic flow meter with clamp on and that from weighing method followed by ISO 4185:1980. As the upstream and downstream distance of clamped meter is one of the important problems of flow measurement in the MWA water system, this study was focused on clamped meter on pipe wall at various upstream and downstream distances.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

II. THEORY BACKGROUND

A. Transit-time Ultrasonic Flow Meter with Clamp-on

The transit-time ultrasonic flow meter with clamp on (v-method) operates based on the time difference between traveling of ultrasonic wave from transmitter to receiver using pipe wall reflection and transmitting back from receiver to transmit in the same direction. The measured transit time is calculated to be the volume flow rate of fluid and fluid velocity as in Fig. 1. The advantages of this meter are noninvasive meter, nonblocking flow of fluid, no pressure loss by instrument, available in wide temperature range, and installed area less than other flow meters [7].

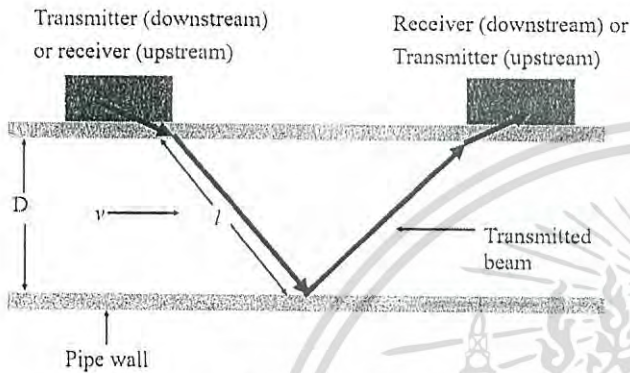


Fig. 1. Transit-time ultrasonic flow meter with clamp-on (V method) (Modified from [7])

B. ISO 4185:1980

ISO 4185 is an international standard used for flow meter calibration in case of liquid flow in closed system. This method was used for calculation of mass flow rate, volume flow rate, velocity, and uncertainties of measurement. Although, this method has many advantages, it is inappropriate with high vapor pressure and corrosive and toxic liquids. These might be affect with the accuracy of this method or danger with the operator during the measurement process. The volume flow rate of the liquid has to use in the range of 0-1.5 m³/s. During the operation, air should be checked to ensure that there is no air in the system [8].

C. Dimensional Analysis Procedure

In this paper, the dimensional analysis based on the Buckingham Pi theorem for simulation of the MWA water system to determine the error in case of inappropriate installation of transit time ultrasonic flow meter. The parameters, which affect errors of ultrasonic flow meter, consist of 3 main parameters groups, i.e., pipe characteristic, meter installation, and fluid characteristic and properties as shown in Table I. Moreover, there are other parameters affecting with measured velocity value, e.g., pipe thickness, fouling thickness, sound speed in the pipe wall, and transit time in pipe wall [7]. Therefore, the meter had to set offset before the testing process was run. In this work, the Buckingham Pi theorem was used because it is suited for the applications having many parameters.

This experiment was operated under assumptions as follows, constant room temperature, steady flow, and fully developed and turbulent region. Prototype (MWA of Thailand water system) conditions are carbon steel pipe

with an internal diameter of 1.5 m containing the water flow rate in the range of 1-3 m/s. The prototype was resized to a tested pipe with a diameter of 2.54 cm.

Eight parameters (m) “m = 8” and three primary parameters (n) “n = 3” i.e. length (L), mass (M), and time (T) are listed in table I. The independent parameters are listed in the term of

$$E = f(D, \rho, \mu, v, L_e, U_s, D_s)$$

and they can group in Pi term as

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5)$$

TABLE I
DIMENSION AND BASIC UNIT WHICH ASSOCIATED WITH ERROR OF ULTRASONIC METER

Variable	Symbol	Basic dimensional
Dependent variable:		
1. Error of ultrasonic flow meter	E	-
Independent variable:		
<i>Pipe characterizes:</i>		
2. Internal diameter	D	L
<i>Fluid properties and characteristics:</i>		
3. Water density	ρ	ML ⁻³
4. Water viscosity	μ	ML ⁻¹ T ⁻¹
5. Velocity	v	LT ⁻¹
6. Entrance region	L _e	L
<i>Flow meter installation:</i>		
7. Upstream	U _s	L
8. Downstream	D _s	L

Considering each group of Pi term,

Group 1 is $\pi_1 = \{ \rho^a v^b D^c \} (E)$

$$= \{ (ML^{-3})^a (LT^{-1})^b (L)^c \} \times 1 = M^0 L^0 T^0$$

since M: a = 0, L: -3a+b+c = 0 and T: -b = 0, then a, b, and c = 0; therefore,

$$\pi_1 = E,$$

Group 2 is $\pi_2 = \{ \rho^{-1} v^{-1} D^{-1} \} (\mu) = \frac{\mu}{\rho v D},$

Group 3 is $\pi_3 = \{ D^{-1} \} (L_e) = \frac{L_e}{D}$

Group 4 is $\pi_4 = \{ D^{-1} \} (U_s) = \frac{U_s}{D},$

and group 5 is $\pi_5 = \{ D^{-1} \} (U_s) = \frac{D_s}{D}.$

The grouping of all Pi term was shown in (1)

$$E = f\left(\frac{\mu}{\rho v D}, \frac{L_e}{D}, \frac{U_s}{D}, \frac{D_s}{D}\right) \tag{1}$$

and they can be regrouped by $\pi_1 \times \pi_3$, then replacing to π_1 with the new Pi term as π_3 is the most parameter affecting to the error, as presented in (2).

$$E \times \frac{L_c}{D} = f\left(\frac{\mu}{\rho v D}, \frac{L_c}{D}, \frac{U_s}{D}, \frac{D_c}{D}\right) \quad (2)$$

All Pi terms are already checked the ranking of variable to ensure that all groups are free from each other. The conclusion of dimensional group is not guaranteed, which parameter does in fact; therefore, this work has to perform by experimental data.

III. EXPERIMENT

A. Similarity of MWA Thailand water system

The parameters were used for dimensional analysis: an error of ultrasonic flow meter, an internal diameter, a water density, a water viscosity, a velocity, an entrance region, and the upstream and downstream of the meter. The pipe with an internal diameter of 1.5 m is the most using in the MWA water system at Reynolds number in the range of 1,857,635-5,614,906. From the dimensional analysis as explained in the previous section, there are 5 groups of Pi terms, i.e., $E \times (L_c/D)$, $\mu/\rho v D$, L_c/D , U_s/D , and D_c/D and the model equation can be expressed in (3) to (7).

$$E_p = 0.3607 \times E_m, \quad (3)$$

$$\left(\frac{\mu}{\rho v D}\right)_m = \left(\frac{\mu}{\rho v D}\right)_p \text{ or } Re_m = Re_p, \quad (4)$$

$$L_{em} = 0.0169 \times L_{ep}, \quad (5)$$

$$U_{sm} = 0.0169 \times U_{sp}, \quad (6)$$

$$D_{sm} = 0.0169 \times D_{sp}, \quad (7)$$

where the subscript with "p" is referred to prototype and "s" is referred to the model. The error of ultrasonic flow meter obtained from model equals to 0.3607 times of prototype error, as expressed in (3). It is called the model predictive equation. Considering in (4), the Reynolds number of models should equal to that of the prototype; however, flow characteristic of water in the model system is impossible to form the same pattern as that of in the prototype system. In this study, velocity profile of water flowing in the pipe with the Reynolds number in the range of 31,692 to 95,078 was used to simulate flow in prototype system to model system. This idea concept was supported from Carlander and Delsing [9], which has reported that a little error of velocity measurement with ultrasonic flow meter was found in the turbulent flow region. They have studied the installation effect on an ultrasonic flow with implications for self-diagnosis and were found that only ± 5 percentage of actual flow rate obtained at the Reynolds number more than 10,000. In (5) to (7), the entrance region, upstream and downstream of meter equal to 0.0169 times of prototype, respectively.

B. Experimental setup

The experiment setup (Fig. 2) consists of a pump, a check valve, a header, a testing section with an ultrasonic flow meter, a globe valve, a diverter, a weighing tank, a sump and a ball valve. The transit time ultrasonic flow meter with clamp on (Fuji Electric system Co., Ltd. FSD220Y1) having a velocity range of 0.3 to 32 m/s, fluid temperature at -40 to 200 °C, the accuracy of ± 0.05 m/s, and the velocity sensitivity of 0.001 m/s, and the internal diameter in the range of 25-50 mm.

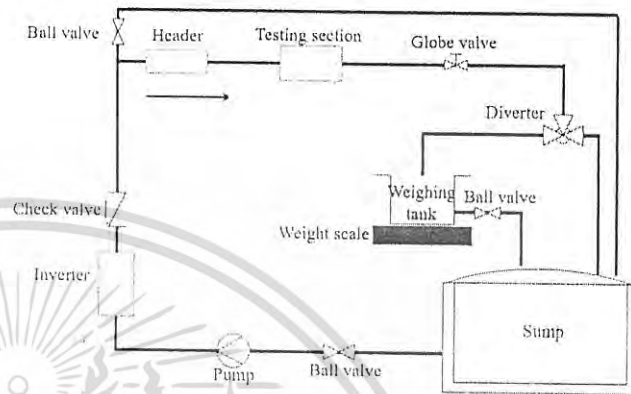


Fig. 2. Diagram of the experimental setup (Modified from [8])

The PVC pipe with an internal diameter of 2.54 cm and the length of 5.3 m, and the header pipe with an internal diameter of 10.16 cm and the length of 1.1 m were constructed to be the model. The main objective of header and globe valve mounted in the experimental unit was to adjust the pattern of water flow and to ensure that the flow characteristic of water was in the fully developed region in a short pipe. Water containing in a sump was pumped through a check valve to assure that the water flows only one direction in the system. The testing section equipped with ultrasonic flow meter was used for flow detection. Diverter was an important device used for changing of water direction from sump to weighing tank installed with the weight scale. At the beginning of the process, air bubbles in water were released from the system for 2 hours through pipe being above the header and testing section. Before running the experiment, air bubbles and flow characteristics were checked by observing via a clear plastic tube constructed as a part of the model.

C. Measurement Method

The ultrasonic flow meter with V method was clamped on the PVC pipe with a diameter of 34 mm. The sound velocity transmitted through 2 mm thickness of pipe wall was set at 2,307 m/s, while it passed through the water at 1,440 m/s. The transition voltage was set at 80 Vp-p. The operating temperature was maintained at room temperature of 23°C having the viscosity of 1.0038×10^{-6} m²/s for all experiments.

The ultrasonic flow meter was set follows to the recommendation of the manufacturer and installed on the tested pipe having the total length of 30 cm at the upstream distance of 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, and 20 times of internal diameter (2.54 cm) and at the downstream distance of 2, 4, 6, 8, and 10 times of internal diameter (Fig. 4, table II). The velocity of water was adjusted from pump speed to

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณาไปใช้

obtain 0.2 and 0.5 m/s. During the measurement process by ultrasonic flow meter, the direction of water was changed from flowing to the sump to the weighting tank for time interval of 5 or 10 seconds depended on the mass flow rate. The experiments were run 3 replications for each condition.

The measurement results were compared between the data obtained from ultrasonic flow meter and that from weighing method and determined the relative error occurred at various positions of clamped meter on the tested pipe.

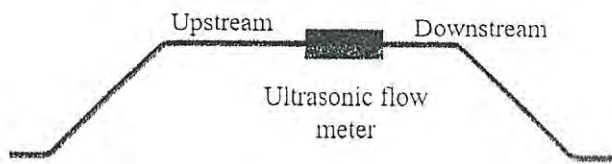


Fig. 3. Ultrasonic flow meter in experimental unit

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

The relative error is used to describe the effect of installation of ultrasonic flow meter in limited space. From table II, relative errors increased with the decreasing of upstream and downstream of meter at the same velocity. Since the installed meter was close to the 45° elbow (upstream < 20D and downstream < 10D), the flow pattern of water in pipe did not completely fully developed region. This can affect to the flow characteristic of water as explained in Ruppel [4]. In this study, the length of entrance region was about 12D and 14D at 0.2 m/s and 0.5 m/s, respectively. This was a cause of the almost constant relative error of velocity measurement beyond 12 D and 14 D of upstream distance at the suitable downstream being more than 10D.

TABLE II
RELATIVE ERRORS WITH DIFFERENT UPSTREAM AND DOWNSTREAM DISPLACEMENT, RESPECTIVELY

Upstream	Downstream	Relative error of 0.2 m/s (%)	Relative error of 0.5 m/s (%)
28D	2D	40.39	23.49
26D	4D	35.56	21.31
24D	6D	30.66	20.08
22D	8D	25.50	19.81
20D	10D	21.69	19.0
18D	12D	21.78	19.84
16D	14D	22.99	21.82
14D	16D	23.21	22.52
12D	18D	27.76	23.53
10D	20D	26.64	24.06
8D	22D	30.58	28.79
6D	24D	27.79	30.88
4D	26D	33.01	35.85
2D	28D	50.20	48.86

At the same position of installation, the more velocity it was, the less relative error was obtained. This was supported by the finding of Carlander and Delsing [3]. The relative

error in velocity of 0.2 m/s was quite a lot because this velocity was below the range of recommendation from the manufacturer.

Also, in this study the observed relative errors were quite high, although the meter was installed based on the theory of fluid mechanics. This is probably due to the velocities of water tested in this paper were rather low, which affects the velocity profile of incompletely steady flow [3].

V. CONCLUSION

The model of the MWA Thailand water system was constructed based on the dimensional analysis and theory of Buckingham Pi, $E \times (L_e/D)$, $\mu/\rho v D$, L_e/D , U_s/D , and U_d/D , to consider the error of velocity measured from ultrasonic flow meter with clamp on at various upstream and downstream distances. It was found that the relative errors of velocity measurement increased with the decreasing of upstream and downstream of meter at the same velocity, and increasing of velocity could reduce the error. However, as the velocities of water tested in this paper were quite low, the obtained errors in this study were high, though the meter was installed followed to the recommendation. The results showed that there was a possibility to determine the correction factor to compensate the velocity measurement of ultrasonic flow meter as the installation could not comply with the requirement. Nevertheless, the further experiments should be performed under the other conditions i.e., increasing of velocity to 3 m/s and diameter of testing pipe for validation of the model predictive equation. That was $E_p = 0.3607 \times E_m$.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to extend grateful thanks to the Metropolitan Waterworks Authority 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, 2000.
- [2] FCI, "Installation recommendations for FCI Single-Point Thermal Dispersion Flow Meter," pp.2, San Marcos, 2016.
- [3] 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. 9, pp. 33-41, 1998.
- [4] C. Ruppel and F. Peters, "Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter," Flow Measurement and Instrumentation. 15 : pp. 167-177, 2004.
- [5] R. Steven, "A dimensional analysis of two phase flow through a horizontally installed Venturi flow meter," Flow Measurement and Instrumentation. 19 : pp. 342-349, 2008.
- [6] W. Chen, Y. Xu, C. Yuan, H. Wu and T. Zhang, "An investigation of wet gas over-reading in orifice plates under ultralow liquid fraction conditions using dimensional analysis," Journal of Natural Gas Science and Engineering 32 : pp. 390-394, 2016.
- [7] NEL, "An introduction to non-invasive ultrasonic flow metering" National Measurement System : pp.8, East Kilbride, 2016.
- [8] INTERNATIONAL STANDARD ISO 4185, "Measurement of liquid flow in closed conduits-weighing method," Switzerland, 1980.
- [9] C. Carlander and J. Delsing, "Installation effects on an ultrasonic flow meter with implications for self diagnostics," Journal of flow measurement and instrumentation 11 : pp. 109-122, 2000.

การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายรัฐโชติ วชิรปัญญานนท์
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 48 หมู่บ้านอิมพีเรียลพาร์ค ถนนเฉลิมพระเกียรติ ร.9 67 แขวงประเวศ เขตประเวศ กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและความเชี่ยวชาญ	<ul style="list-style-type: none">- งานวิจัยเรื่องผลของลักษณะพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีต่อการสะสมของสารอินทรีย์- งานวิจัยเรื่องอิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่างของตัวอย่างหมูอินฟราเรด ต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เนื้อหมู- บรรยาย เรื่องเครื่องมือวัดการไหลที่ถูกสุลักษณะในโรงงานอาหาร งาน “Food engineering 4.0”- พัฒนาอาหารจากโครงการ “หนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP)” ของจังหวัดพิษณุโลก- ประชุมวิชาการงาน The 2017 IAENG International Conference on Control and Automation บรรยายเรื่อง “Similarity model of MWA Thailand water system for error estimation of ultrasonic flow meter” ที่ประเทศฮ่องกง- เข้าร่วมการอบรมสุลักษณะในโรงงานอาหาร กับองค์กร European Hygienic Equipment Design Group (EHEDG) ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้