



## รายงานการวิจัย

การสร้างและหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

The Construction and Efficiency of Experimental Set of Viscosity Meter on the Fluid by

Ultrasonic Wave

ผู้วิจัย

นายบุญคุ้ม กงมหา

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดินปี พ.ศ. 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



## รายงานการวิจัย

การสร้างและหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

The Construction and Efficiency of Experimental Set of Viscosity Meter on the Fluid by

Ultrasonic Wave

ผู้วิจัย

นายบุญคุ้ม กงมหา

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดินปี พ.ศ. 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและเพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งชุดทดลองประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ถังน้ำ ส่วนที่ 2 ท่อน้ำที่มีหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกภายในท่อ โดยท่อมีย่านผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0139 เมตร ยาว 5 เมตร ตรงกลางท่อเจาะท่อ 2 ช่องให้พอดีกับหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ โดยวางให้ทำมุม 30 องศา ส่วนที่ 3 ถังรองน้ำและส่วนป้อนกลับของของไหล และส่วนที่ 4 ชุดควบคุมและจอแสดงผล

เมื่อนำชุดทดลองดังกล่าวมาหาประสิทธิภาพของชุดทดลองโดยวัดความหนืดของน้ำด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 313.15 K จำนวน 50 ครั้ง ได้ค่าความหนืดเฉลี่ยอยู่ที่  $0.000590 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\pm 0.000016$  ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความหนืดน้ำมาตรฐานที่  $0.000656 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน คิดเป็นค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10.

### Abstract

The objective of this research is to create a set of experiments for measuring the viscosity of the fluid with ultrasonic waves and to determine the efficiency of an experimental set to measure the viscosity of the fluid with ultrasonic waves. The set of experiments consists of four major component parts. Part 1 is the water tank, part 2 is a head of ultrasonic transducer set in the pipe with diameter of pipe 0.0139 meters wide and long 5 meters. Drill pipe on two channels to fit on two channels ultrasonic transducer at center position of pipe length by placing it at an angle of 30 degrees, part 3 the water tank and part 4 is control and display.

Then measure efficiency of the experimental set to measure viscosity of water with ultrasonic waves at temperature 313.15 K and 50 times. The viscosity average is  $0.000590 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  and standard deviation is  $\pm 0.000016$  which is close to viscosity of water standards and percentage of average errors are 10 percent.



## กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยเรื่อง การสร้างและหาประสิทธิภาพการวัดความหนักของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โครงการทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2554 ซึ่งโครงการวิจัยนี้เกิดขึ้นจากการสนับสนุนของสถาบันวิจัยและพัฒนา (สวพ.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยได้รับการฝึกอบรมเพื่อให้ผู้วิจัยเข้าใจแนวทางในการวิจัยอย่างมีคุณภาพ การให้การประสานงานและการอำนวยความสะดวกต่างๆ ทำให้การจัดการโครงการงานวิจัยได้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาและเจ้าหน้าที่ทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง ขอขอบคุณอาจารย์สุชาติ แซ่เฮง ที่กรุณาให้ความรู้และชี้แนะแนวทางให้คำปรึกษาที่คิงานงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณ ผศ.สุจิตต์ ศรีชัย ที่ช่วยชี้แนะและเป็นกำลังใจอันสำคัญ และขอขอบคุณลูกศิษย์ นายวสันต์ ถาวร ที่มาช่วยงานวิจัยจนงานสำเร็จด้วยดี

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ สาขาวิชาฟิสิกส์ รวมถึงเพื่อนๆ ของผู้วิจัยที่ให้ความช่วยเหลือและให้ข้อเสนอแนะต่างๆ ที่มีส่วนทำให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอระลึกถึงพระคุณท่านผู้มีพระคุณทั้งหลายของผู้วิจัย คุณบิดามารดาและคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ตลอดมา หากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและมีโอกาสจะทำการปรับปรุงต่อไป

ผู้จัดทำ

กันยายน 2555

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
Abstract	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญ	(4)
สารบัญตาราง	(6)
สารบัญภาพ	(7)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 การทบทวนวรรณกรรม	4
2.1 ความหนืด	4
2.2 พฤติกรรมการไหลของของไหลในท่อ	8
2.3 อัตราการไหลของของไหล	15
2.4 การไหลในทรงกระบอก	17
2.5 คลื่นอัลตราโซนิก	20
2.6 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์	22
2.7 กลไกการเกิด Cavitation	23
2.8 การวัดอัตราการไหลของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	26
3 วิธีดำเนินการวิจัย	30
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	30
3.2 วิธีการ	34
3.3 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	41

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	42
4.1 ผลการสร้างชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	42
4.2 ผลการหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	44
5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุป อภิปรายผล	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก สมการของ Reynolds number	57
ภาคผนวก ข การหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K	59
ภาคผนวก ค ประวัติผู้รับผิดชอบแผนงานวิจัย	61

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลการวัดความหนืด $\eta$ ของน้ำที่อุณหภูมิ 313.5 K ด้วยชุดทดลองการวัดความหนืดของไหลด้วยคลื่น อัลตราโซนิก จำนวน 50 ครั้ง	46
2	ผลการวัดความหนืด $\eta$ ของน้ำที่อุณหภูมิ คือ 283.15 K 288.15 K 293.15 K 303.15 K และ 313.15 K ด้วยชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	50



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ความหนืดสัมบูรณ์ $\eta$ ของของไหล	6
2	ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนต่ออัตราการเสียรูปของของไหลนิวโตเนียน	7
3	ธรรมชาติความเร็วของของไหลภายในท่อ (velocity profile) ณ จุดต่าง ๆ แกนตั้ง คือ เส้นตัดขวางของท่อในแนวตั้งฉากจากผิวท่อด้านบนมายังผิวท่อด้านล่าง แกนนอน คือความเร็วในการไหลของของไหลในท่อ ณ จุดต่าง ๆ จะเห็นว่าความเร็ว ที่ผิวต้องเป็นศูนย์และเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากผิวท่อไปเรื่อยๆ จุดที่มีความเร็ว สูงสุดคือที่ จุดศูนย์กลางท่อ	8
4	การไหลภายใน stream tube	9
5	ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับอัตราการเสียรูปของของไหลชนิดต่าง ๆ	11
6	ความสัมพันธ์ของการเสียรูปของของไหลเทียบกับเวลา	12
7	แสดงลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวยาวของท่อเมื่อไหลแบบราบเรียบ	19
8	ส่วนประกอบหลักของพีโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์	23
9	หลักการทำงานของแบบ Counterpropagating	27
10	ช่วงที่คลื่นอัลตราโซนิคเดินทางตามและสวนกระแสการไหล	27
11	หัวอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ แบบ piezoelectric 40k Hz	30
12	AC-amplifier รุ่น LEYBOLD 416010	31
13	Function generator รุ่น Tektronix AFG 3021B	31
14	ออสซิลโลสโคป รุ่น Tektronix TDS 1012	32
15	มัลติมิเตอร์ รุ่น Extech 410	32
16	ฮีตเตอร์ รุ่น pcospec 105 ขนาด 1,000 วัตต์	33
17	แบบท่อแบบที่ 1	34
18	แบบท่อแบบที่ 2	35
19	วิธีการส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิคภายนอกท่อ	36
20	วิธีการส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิคภายในท่อ	36
21	ถังพลาสติกกับข้อต่อตรงด้วยวิธีการเชื่อมพลาสติก	37
22	ท่อน้ำวางตามแนวราบยึดติดกับแคลมป์	37
23	หัวอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ 2 หัวติดตั้งอยู่ระหว่างกลางท่อ	38

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	การหาค่า $t_{down}$ เมื่อส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกไปตามกระแสการไหลของน้ำ	39
25	การหาค่า $t_{up}$ เมื่อส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกทวนกระแสการไหลของน้ำ	40
26	ภาคการรับสัญญาณเมื่อหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ส่งคลื่นอัลตราโซนิกไปตามกระแสการไหลของน้ำ	43
27	ภาคการรับสัญญาณเมื่อหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ส่งคลื่นอัลตราโซนิกไปทวนกระแสการไหลของน้ำ	43
28	ส่วนประกอบสำคัญของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	44
29	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K จำนวน 50 ครั้ง ของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	49
30	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในช่วงอุณหภูมิ 283.15 K 288.15 K 293.15 K 303.15 K และ 313.15 K กับค่าความหนืดมาตรฐาน	52

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมในประเทศที่มีความสำคัญในระดับต้นๆ ของประเทศ ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมยาและเคมีภัณฑ์ และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น โดยอุตสาหกรรมดังกล่าวมักมีการตรวจรับวัตถุดิบหรือควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐานตามกำหนด อาทิ ความหนืดของน้ำมัน น้ำเชื่อม สารละลายต่างๆ รวมทั้งยาและเคมีภัณฑ์ เพื่อให้ได้วัตถุดิบที่ได้มาตรฐาน มีสิ่งปลอมปนต่ำ ได้วัตถุดิบตั้งต้นที่มีคุณภาพในการผลิตที่เหมาะสมต่อไป

การตรวจสอบคุณภาพโดยการวัดความหนืด เป็นสิ่งที่จำเป็นในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อมูลความหนืดของของเหลว สามารถบอกถึงคุณภาพบางประการของวัตถุดิบ เช่น การวัดความหนืดในน้ำมันเครื่อง ทำให้ผู้ผลิตสามารถเลือกและควบคุมค่าความหนืดที่เหมาะสมกับการหล่อลื่นภายในเครื่องยนต์ เครื่องสำอางมีการจัดทำข้อกำหนดคุณภาพ โดยมีความหนืดเป็นเกณฑ์ร่วมอยู่ด้วย (กองควบคุมเครื่องสำอาง, มปป: ออนไลน์) หรือดังที่ Kandpal and Madan (1994) กล่าวว่าในน้ำมันสบู่ดำมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณสูง คือ มีปริมาณกรดโอเลอิก ร้อยละ 44.8 และกรดไลโนเลอิก ร้อยละ 34.0 ซึ่งส่งผลให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความหนืดที่เหมาะสมและมีคุณภาพดี เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการวัดความหนืดเข้ามามีบทบาทสำคัญในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมวงการต่างๆ อย่างหลากหลาย

ในปัจจุบันการวัดความหนืดของของไหลมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ โดยความหนืดของของไหลมีความสำคัญสามารถบอกถึงความเสียดทานภายในของไหล การวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการวัดความหนืด โดยคลื่นอัลตราโซนิก หรือคลื่นเหนือเสียงหรือคลื่นอัลตราโซนิกหรืออัลตราซาวนด์ เป็นคลื่นกลที่มีความถี่ 20 kHz - 600 MHz และการเลี้ยวเบนของลำคลื่นของคลื่นอัลตราโซนิกจะเกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการวัดความลึกของทะเลหรือมหาสมุทร หาค่าแห่งของวัตถุใต้น้ำ อาทิ เรือดำน้ำ ผีเสื้อปลา เป็นต้น (สุชาติ, 2544)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำคลื่นอัลตราโซนิกดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในการวัดความหนืด โดยสร้างและทดสอบประสิทธิภาพชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ในการพัฒนาต้นแบบเครื่องวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบที่เป็นของไหลต่างๆ ในวงการอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรม

อาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมยาและเคมีภัณฑ์ และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น และจะยังเป็น ประโยชน์ในวงการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีคลื่นอัลตราโซนิคเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาประเทศต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

1.2.2 เพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

สร้างชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

ในการสอบวัดเครื่องมือ ใช้น้ำอุณหภูมิ 313.15 K ในการสอบวัดค่าความหนืด

การหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิคโดยการหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K แล้วหาความแม่นยำ ของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิคโดยหาความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K จำนวน 50 ครั้ง วิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

รูปแบบการพัฒนามุ่งทำในของไหลแบบ Newtonian

โดยความหนืดของของไหล หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) ของของไหลกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือน (shear rate) ของของไหล ในท่อของของไหล (Wang และคณะ, 2004) สำหรับการไหลของของไหลซึ่งจะพิจารณาการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ดังนี้

$$\eta(r) = \frac{\sigma(r)}{\dot{\gamma}(r)} \quad (1)$$

เมื่อ  $\sigma(r)$  และ  $\dot{\gamma}(r)$  คือความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งของท่อรัศมี  $r$  ของของไหลตามลำดับ ส่วนความเครียดเฉือนพิจารณาในเทอมของ velocity gradient คือ

$$\dot{\gamma}(r) = \left| \frac{dv_z(r)}{dr} \right| \quad (2)$$

และความเค้นเฉือนคือ

$$\sigma(r) = \frac{\Delta p}{2L} r \quad (3)$$

เมื่อ  $\Delta P$  คือผลต่างของความดันที่ปลายท่อซึ่งท่อมีความยาว  $L$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \left[ -\mu \frac{dv_z(r)}{dr} \right] \right\} = \frac{\Delta P}{L} \quad (4)$$

โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$\text{BC1: } r = R; v_z = 0 \quad (5)$$

$$\text{BC2: } r = 0; \frac{dv_z}{dr} = 0 \quad (6)$$

จากสมการที่ (4) ผลเฉลยคือ

$$v_z = \frac{(\Delta P)R^2}{4\eta L} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (7)$$

เมื่อ  $R$  คือ รัศมีของท่อ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 จดสิทธิบัตรเครื่องวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

1.5.2 เผยแพร่ในวารสารทางด้านฟิสิกส์

1.5.3 หน่วยงานที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.5.3.1 อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม

1.5.3.2 อุตสาหกรรมปิโตรเลียม

1.5.3.3 อุตสาหกรรมยาและเคมีภัณฑ์

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 ความหนืด

Young and Freedman (2000) กล่าวว่า ความหนืดเป็นความเสียดทานภายในของของไหล แรงจากความหนืดจะต้านการเคลื่อนที่ของชั้นของไหลที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับชั้นของของไหลอื่น ของไหลที่อยู่ในท่อชั้นของไหลที่สัมผัสกับผิวของแข็งมีแนวโน้มที่จะยึดติดกับผิวของแข็งและบริเวณใกล้ผิวสัมผัสจะเกิดชั้นขอบเขตบางๆ ของของไหล โดยของไหลในชั้นขอบเขตบางๆ นี้แทบจะหยุดนิ่งเมื่อเทียบกับผิวสัมผัส ดังนั้นความหนืดของของไหลหมายถึงอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือน ในของไหลกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือนในของไหลดังนั้น

$$\eta = \frac{F/A}{v/l} \quad (8)$$

หน่วย SI ของความหนืด คือ  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  หรือ Pa.s แต่หน่วยของความหนืดนิยมใช้กันโดยทั่วไปคือ poise โดยที่

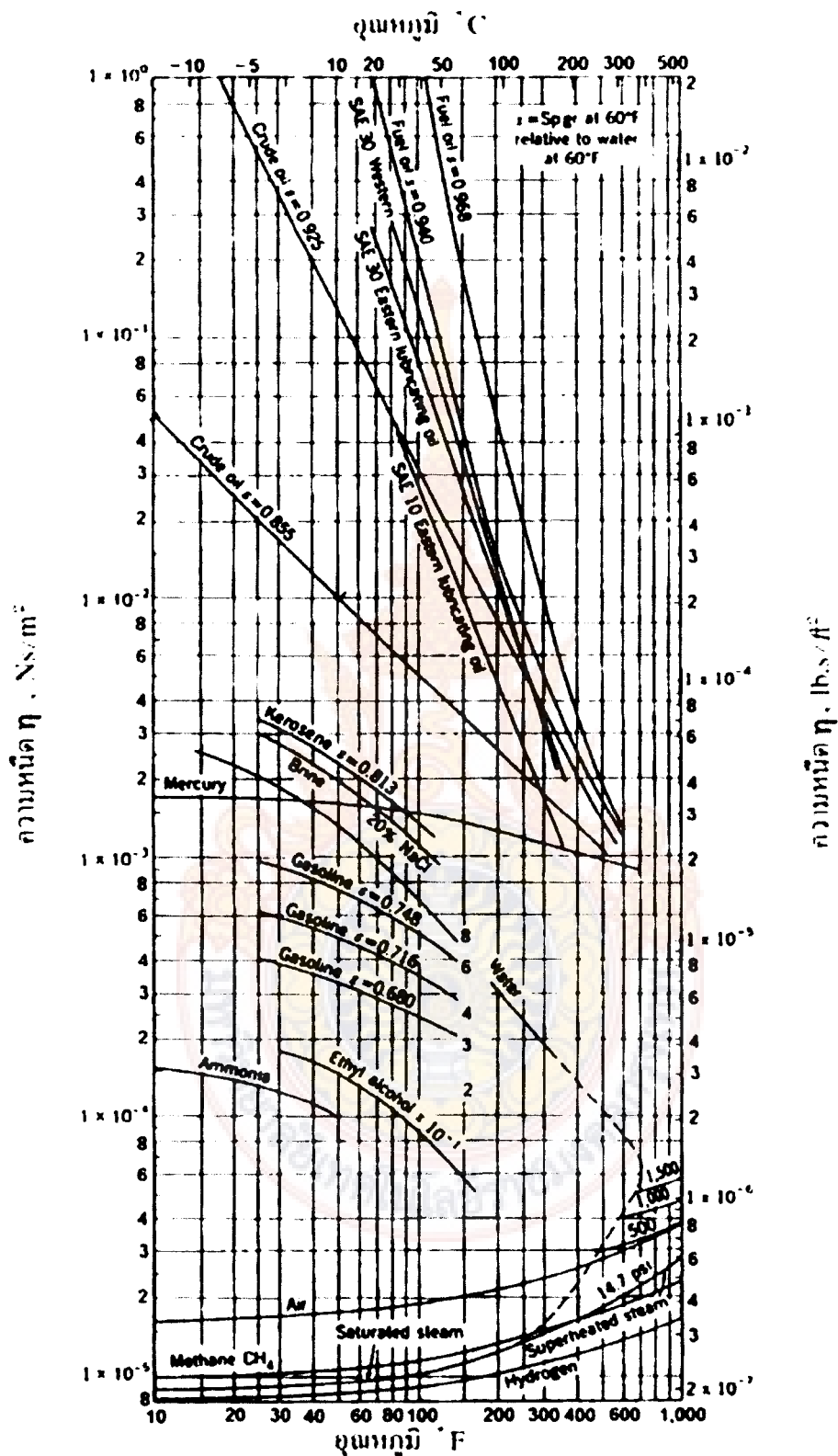
$$1 \text{ poise} = 1 \text{ dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2 = 0.1 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$$

ในบรรดาคุณสมบัติทั้งหลายของของไหลนั้น ความหนืดนับว่าเป็นคุณสมบัติที่ให้นิยามได้ยากที่สุด เพราะคุณสมบัติอื่น ๆ ส่วนใหญ่เป็นคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ หรือเชิงอุณหพลศาสตร์ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการไหล แต่ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่เรียกกันว่า “คุณสมบัติเชิงการส่งถ่าย” (transport property) ซึ่งจะแสดงตัวเฉพาะเมื่อมีการไหลตัวเท่านั้น ดังนั้น นิยามของความหนืดจึงต้องมีการไหลตัวของของไหลเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

ผู้ศึกษาส่วนใหญ่สามารถจินตนาการได้ว่า น้ำมันเครื่องรถยนต์หรือรถมอเตอร์ไซค์มีความข้นและมีความหนืดมากกว่าน้ำ และหากมีการหยดตัวออกจากรูรั่วที่กันถังที่มีขนาดเดียวกัน น้ำมันเครื่องจะหยดได้ช้ากว่าการหยดของน้ำ ที่เป็นเช่นนี้เพราะมีแรงต้านทานการไหลของของไหลที่มีความหนืด ยังมี

ความหนืดมากก็ยังมีแรงต้านการไหลมาก แรงต้านนี้คือแรงเฉือน (shear force) ที่เกิดขึ้นในแนวขนาน (แต่ทิศทางตรงกันข้าม) กับแนวการไหล (ทวิช, 2548)

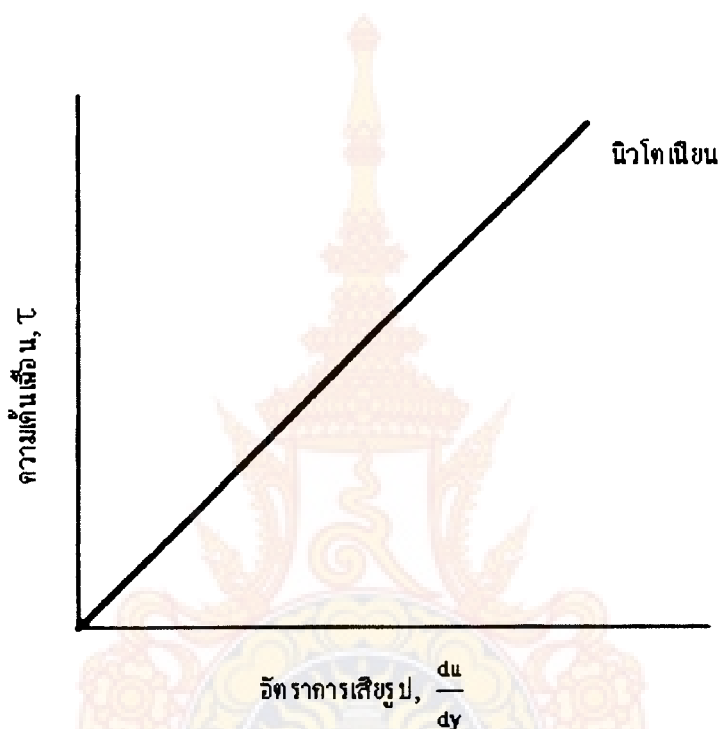
ความหนืดของของไหลเป็นค่าความต้านทานต่อแรงเฉือน หรือเป็นค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปเชิงมุม (angular deformation) แรงเสียดทานในของไหลที่กำลังเคลื่อนที่อยู่นั้นเป็นผลมาจากแรงเกาะกันระหว่างโมเลกุลและการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมในระหว่างโมเลกุลของของไหล ในภาพที่ 1 เป็นค่าความหนืดของของไหลบางชนิด จากภาพจะเห็นได้ว่าในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้นความหนืดของของเหลวทุกชนิดจะลดน้อยลง ส่วนความหนืดของแก๊สทุกชนิดกลับเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะแรงเกาะกันระหว่างโมเลกุลที่หายไปนั้นเป็นลักษณะเด่นของของเหลว ส่วนแก๊สนั้นลักษณะเด่นเกิดมาจากการแลกเปลี่ยนโมเลกุลในระหว่างชั้นของของไหลที่มีความเร็วแตกต่างกัน โมเลกุลที่อยู่ในชั้นของไหลที่เร็วกว่าจะย้ายไปอยู่ในชั้นของไหลที่ช้ากว่า และไปทำให้ของไหลชั้นที่ช้ากว่านั้นเคลื่อนที่เร็วขึ้น ส่วนโมเลกุลจากชั้นที่ช้ากว่าก็จะย้ายไปอยู่ในชั้นที่เร็วกว่า และไปหน่วงให้ชั้นที่เร็วกว่านั้นเคลื่อนที่ช้าลง การแลกเปลี่ยนโมเลกุลเช่นนี้ทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้น หรือทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นในระหว่างชั้นที่อยู่ติดกันนั้น ดังนั้น การเคลื่อนไหวของโมเลกุลแก๊สที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูง ๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แก๊สมีความหนืดสูงขึ้น (สุนันท์, 2548)



ภาพที่ 1 ความหนืดสัมบูรณ์  $\eta$  ของของไหล

ที่มา: สุนันท์ (2548)

หากนำค่าความเค้นเฉือนที่กระทำต่อของไหลมาเทียบกับค่าอัตราการเสียรูปเชิงมุมของของไหล (ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความชันของความเร็วต่อระยะห่าง ( $du / dy$ )) และความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนกับค่าอัตราการเสียรูปนั้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้นดังที่แสดงในภาพที่ 2 ของไหลที่มีพฤติกรรมดังกล่าวนี้ จะถูกเรียกว่าของไหลนิวโตเนียน (Newtonian fluid) (สมศักดิ์, 2552)



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนต่ออัตราการเสียรูปของของไหลนิวโตเนียน

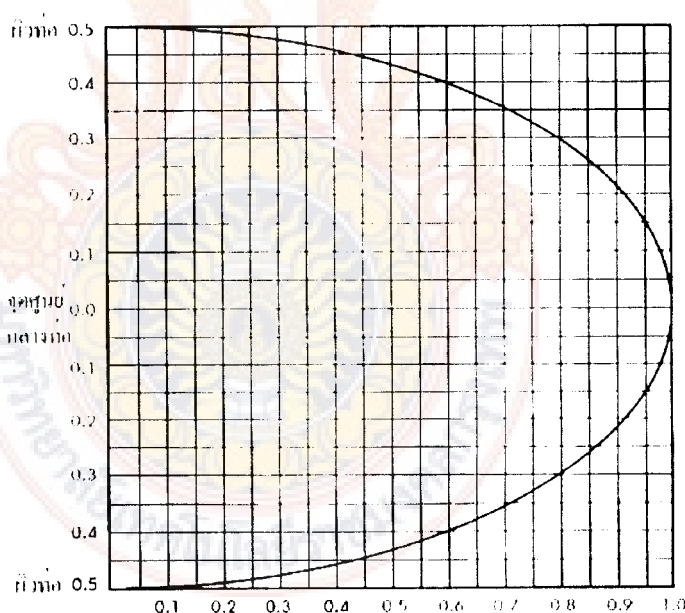
ที่มา: สมศักดิ์ (2552)

ค่าความชันจากภาพที่ 2 จะบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเสียรูป ในของไหลที่มีเส้นความชันดังกล่าวน้อย จะหมายความว่าของไหลดังกล่าวมีอัตราการเสียรูปค่อนข้างมากภายใต้การกระทำของความเค้นเฉือนที่มีค่าต่ำ ในขณะที่ถ้ากราฟเส้นตรงของของไหลที่พิจารณา มีค่าความชันสูง จะหมายความว่า จะต้องให้ค่าความเค้นเฉือนมากในการจะทำให้เกิดค่าการเสียรูปที่มีขนาดไม่มากนัก นั่นก็คือ ของไหลที่มีความชันน้อยก็จะหนืดน้อยกว่า

จะเห็นได้ว่า ค่าความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะอย่างหนึ่งของของไหลที่จะมีผลต่อความต้านทานของการเสียดรูป และค่าความหนืดนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโมโคนามิกส์ของของไหลซึ่งแปรตามค่าความดันและอุณหภูมิ แต่จากการทดลองจะพบว่าค่าความหนืดของของไหลจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้ามากเมื่อแปรค่าความดันไป ในขณะที่ค่าความหนืดจะแปรค่าค่อนข้างมากเมื่อแปรค่าอุณหภูมิดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่าความหนืดของของไหลเป็นฟังก์ชันอย่างอ่อน (weak function) กับค่าความดัน ในขณะที่เป็นฟังก์ชันอย่างมาก (strong function) กับอุณหภูมิ (สมศักดิ์, 2552)

## 2.2 พฤติกรรมการไหลของ ของไหลในท่อ

พฤติกรรมการไหลของ ของไหล เป็นความรู้ทั่วไปที่ต้องทราบไว้เพื่อใช้พิจารณาในการติดตั้ง เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ดี



ภาพที่ 3 ธรรมชาติความเร็วของของไหลภายในท่อ (velocity profile) ณ จุดต่าง ๆ

แกนตั้ง คือเส้นตัดขวางของท่อในแนวตั้งฉากจากผิวท่อด้านบนมายังผิวท่อด้านล่าง

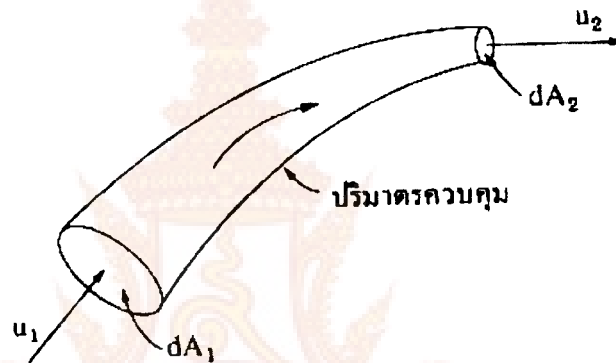
แกนนอน คือความเร็วในการไหลของของไหลในท่อ ณ จุดต่าง ๆ

จะเห็นว่าความเร็วที่ผิวต้องเป็นศูนย์และเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากผิวท่อไปเรื่อยๆ จุดที่มีความเร็ว

สูงสุดคือที่จุดศูนย์กลางท่อ

ที่มา: สมศักดิ์ (2540)

ภาพที่ 4 เป็นภาพที่เกิดจากการล้อมรอบของเส้นสตรีมไลน์กลุ่มหนึ่ง เรียกต่อดังกล่าวนี้ว่า stream tube เนื่องจากทุก ๆ ด้านของ stream tube นี้ถูกล้อมรอบด้วยเส้นสตรีมไลน์ และด้วยเหตุที่ไม่มีความเร็วสุทธิอยู่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นสตรีมไลน์ ดังนั้นจึงไม่มีของไหลไหลเข้าออกจากผิวของ stream tube นี้ ยกเว้นเฉพาะที่ปลายทั้งสองของ stream tube นี้เท่านั้น ปริมาตรภายใน stream tube ที่มีขนาดคงที่ซึ่งอยู่ในระหว่างหน้าตัดสองหน้าตัดนั้นเรียกว่าปริมาตรควบคุม และจะใช้  $\forall$  เป็นตัวแสดงถึงขนาดของปริมาตรควบคุมนี้ ตามหลักของ Newtonian physics นั้น (นั่นคือ ไม่คำนึงถึงความสามารถที่จะเปลี่ยนมวลเป็นพลังงาน) มวลภายในปริมาตรควบคุมก็จะต้องมีจำนวนเท่าเดิม (สุนันท์, 2548)



ภาพที่ 4 การไหลภายใน stream tube

ที่มา: สุนันท์ (2548)

ถ้าหากมวลของของไหลที่อยู่ในปริมาตรควบคุมซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $\forall$  เมื่อเวลา  $t$  มีค่าเท่ากับ  $(mass)_t$  แล้วมวลของของไหลที่อยู่ในปริมาตรควบคุม  $\forall$  เมื่อเวลา  $(t + dt)$  ก็จะต้องมีค่าเป็น

$$(mass)_{t+dt} = (mass)_t + (\rho_1 u_1 dA_1) dt - (\rho_2 u_2 dA_2) dt$$

แต่มวลที่อยู่ในปริมาตรควบคุม  $\forall$  เมื่อเวลา  $(t + dt)$  นี้สามารถเขียนในอีกลักษณะหนึ่งได้ว่า

$$(mass)_{t+dt} = (mass)_t + \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \cdot \forall$$

เมื่อ  $\partial\rho/\partial t$  เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหล ฉะนั้นเมื่อนำเอาค่า  $(mass)_{t+dt}$  ของสมการข้างต้นทั้งสองมาเท่ากันแล้วก็จะได้

$$(\rho_1 u_1 dA_1) dt - (\rho_2 u_2 dA_2) dt = \frac{\partial\rho}{\partial t} \cdot dt \cdot \forall$$

และ

$$\rho_1 \int_{A_1} u_1 \cdot dA = \rho_2 \int_{A_2} u_2 \cdot dA = \int_{\forall} \frac{\partial\rho}{\partial t} \quad (9)$$

สมการดังกล่าวนี้เป็นสมการการไหลต่อเนื่องสำหรับการไหลในขอบเขตที่มีขนาดตายตัวซึ่งมีใจความว่าอัตราสุทธิของมวลที่ไหลเข้าไปในปริมาตรควบคุม จะเท่ากับอัตราของมวลที่เพิ่มขึ้นในปริมาตรควบคุมนั้น สมการที่ (9) นี้สามารถลดรูปลงให้เหมาะกับการใช้งานของแต่ละกรณีเช่น

ในกรณีที่เป็น steady flow ซึ่งมีค่า  $\partial\rho/\partial t = 0$  นั้นสมการที่ (9) จะลดรูปเป็น

$$\rho_1 \int_{A_1} u_1 \cdot dA = \rho_2 \int_{A_2} u_2 \cdot dA$$

หรือ  $\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = m \quad (10a)$

หรือ  $\gamma_1 A_1 V_1 = \gamma_2 A_2 V_2 = G \quad (10b)$

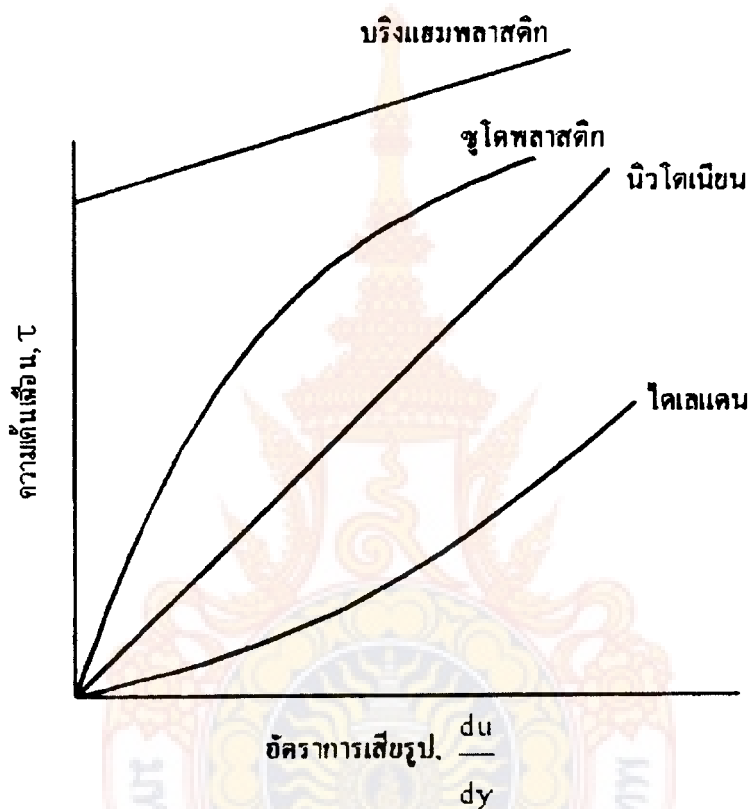
ถ้าเป็น steady flow และของไหลนั้นอัดตัวไม่ได้ (incompressible) ซึ่งจะมีค่า  $\rho$  คงที่นั้น สมการที่ (9) จะลดรูปเป็น

$$\int_{A_1} u_1 \cdot dA = \int_{A_2} u_2 \cdot dA$$

หรือ  $A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q \quad (11)$

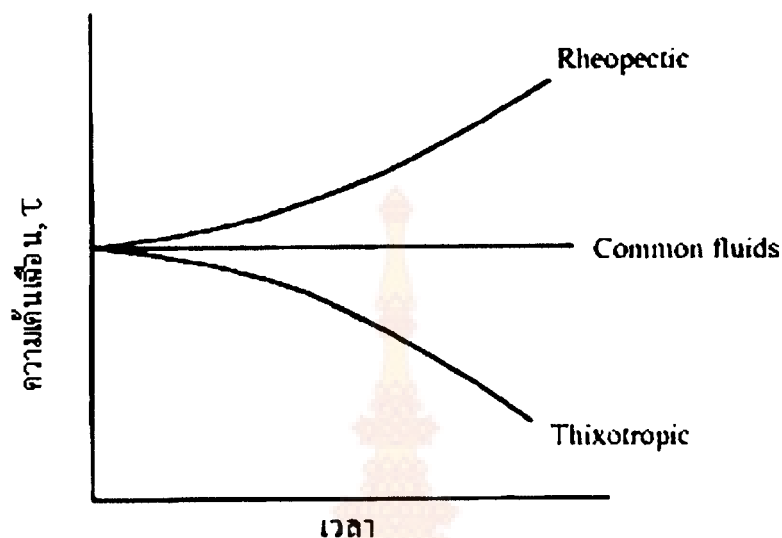
สมการเหล่านี้เป็นสมการการไหลต่อเนื่องที่ใช้กับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ทั้งการไหลแบบ steady flow และ unsteady flow ภายในขอบเขตที่ตายตัว (สุนันท์, 2548)

สำหรับของไหลที่มีพฤติกรรมของอัตราการเสียรูป กับค่าความเค้นเฉือนที่กระทำเป็นลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรงจากจุดตัดของแกน จะเรียกของไหลดังกล่าวว่าของไหลแบบไม่เป็นนิวโตเนียน (non newtonian fluid) ซึ่งของไหลดังกล่าวจะมีพฤติกรรมดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 5 และ 6 (สมศักดิ์, 2552)



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับอัตราการเสียรูปของของไหลชนิดต่าง ๆ

ที่มา: สมศักดิ์ (2552)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของการเสียรูปของของไหลเทียบกับเวลา

ที่มา: สมศักดิ์ (2552)

ภาพที่ 6 แสดงถึงพฤติกรรมของอัตราการเสียรูปที่แปรตามค่าความเค้นเฉือนที่กระทำซึ่งอาจแบ่งเป็น ของไหลแบบไดเลเตนต์ (dilatants) ของไหลแบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic) และของไหลแบบบิงแฮมพลาสติก (Binghamplastic) ซึ่งจะแตกต่างจากของไหลแบบนิวโตเนียนซึ่งแสดงไว้ในรูปด้วยเพื่อเป็นการเปรียบเทียบ

ของไหลแบบไดเลเตนต์ (dilatants) จะเป็นของไหลที่หนืดมากขึ้นตามแรงเฉือนที่มากกระทำ บางทีจะเรียกของไหลแบบไดเลเตนต์ว่า ของไหลข้นขึ้นจากการเฉือน (shear thickening fluid) ตัวอย่างของของไหลแบบไดเลเตนต์ ได้แก่ ทรายเปียก (ที่อยู่ในหล่มทรายคูด) และแป้งข้าวโพดเปียก เป็นต้น

ของไหลแบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic) จะเป็นของไหลที่หนืดน้อยลงหากแรงเฉือนที่มากกระทำมีค่ามากขึ้น บางทีจะเรียกของไหลแบบซูโดพลาสติกว่า ของไหลข้นน้อยลงจากการเฉือน (shear thinning fluid) ตัวอย่างของของไหลแบบซูโดพลาสติก ได้แก่ สีทาบ้าน และ สารพลาสติกเหลว เป็นต้น สีทาบ้านเกาะติดอยู่กับตัวแปรงไม่หยดลงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่มากกระทำต่อสีก่อให้เกิดแรงเฉือนน้อย

แต่เมื่อนำแปรงทาสีไปทาลงบนผนัง สีจะถูกแรงกระทำ ก่อให้เกิดแรงเฉือนที่กระทำต่อสีบนผนังสูงมากขึ้น ตัวสีจะมีความหนืดลดลงทำให้ตัวสีสามารถกระจายตัวเป็นชั้นบางเคลือบอยู่บนผนัง ได้โดยง่าย

ของไหลแบบบิงแฮมพลาสติก (Binghamplastic) จะเป็นของไหลที่ตอนเริ่มต้นจะมีลักษณะเป็นของแข็ง และเมื่อออกแรงเฉือนมากกระทำจนมีค่าเกินกว่าค่า yield ของไหลจะเริ่มไหลตัวอย่างของของไหลแบบบิงแฮมพลาสติกจะได้แก่ ยาสีฟัน มายองเนส และซอสมะเขือเทศในขวด เป็นต้น (สมศักดิ์, 2552)

### 2.2.1 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

การไหลแบบราบเรียบมีลักษณะการไหลจะเป็นไปอย่างนั้นราบเรียบ ชั้นของ ของไหลจะขนานกันไปตลอด การไหลในลักษณะนี้จะเกิดจากของไหล นั้นมีความเหนียวชั้นมาก เช่น กลิเซอริน น้ำมันเตา อนุของสารเหล่านี้จับตัวกันแน่นหรืออัตราการไหลมีค่าต่ำมาก

ในการวัด การไหลโดยทั่ว ๆ ไป ส่วนใหญ่จะไม่พบการไหลแบบราบเรียบ นี้คือข้อดีของการไหลแบบราบเรียบ คือ ให้ Rangeability ดีกว่าแบบ Turbulent มากในเครื่องวัดการไหลแบบ Turbulent ค่าอัตราการไหลการไหลจะแปรผันกับความดันดิฟเฟอเรนเชียลกำลังสอง ซึ่งจะให้ Rangeability ประมาณ 5:1 เป็นอย่างสูง แต่ในการไหลแบบราบเรียบ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า การไหลกับความดันดิฟเฟอเรนเชียลจะเป็นไปในแบบเชิงเส้น (Linear) ทำให้ได้ค่า Rangeability ได้ถึง 100:1 และให้ความถูกต้องดีตลอดย่าน ผิดกับแบบ Turbulent ที่ให้ความถูกต้องดีเฉพาะ Flow ย่านสูง ๆ แต่ย่านต่ำ ๆ จะมีค่าผิดพลาดสูง

การแบ่งย่าน การไหลแบบราบเรียบ กับ Turbulent Flow พิจารณาที่ค่า Reynolds number ถ้าค่า  $R_e$  จาก 0 ถึง 2000 เป็นย่านการไหลแบบราบเรียบ

แต่ช่วง  $R_e$  2000 ถึง 4000 จะเป็นย่านวิกฤติ (Critical Zone) ซึ่งมีการไหลทั้งสองแบบผสมกัน (สมศักดิ์, 2540)

## 2.2.2 ค่าเลขเร โนลด์ (Reynold number)

Osborne Reynold วิศวกรชาวอังกฤษ (เป็นผู้มีชื่อเสียงในวงการกลศาสตร์ของไหล) ได้ขอสรุปจากการทดลองการไหลในท่อกลมว่า ของไหลเปลี่ยนสภาพจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อค่าตัวเลข  $\rho DV / \eta$  มีค่าใหญ่เกินกว่าค่าวิกฤตค่าหนึ่ง ละค่าเลขวิกฤตนี้เท่ากันเสมอไม่ว่าขนาดท่อจะใหญ่หรือเล็กเท่าใดก็ตาม หรือของไหลจะมีความหนาแน่นหรือความหนืดมากน้อยเพียงใดก็ตาม ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการตีความว่าค่าเลขนี้ (ซึ่งได้ตั้งให้เป็นเกียรติแก่ผู้ค้นพบว่า ค่าเลขเร โนลด์) มีนัยสำคัญอย่างไร เพราะเป็นตัวแปรในการทำการทดลองหรือการศึกษาใดๆ ในทางกลศาสตร์ของไหลเสมอ ประกอบกับความจริงที่ว่า การไหลในการใช้งานจริงที่ว่า การไหลในการใช้งานจริงนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเสมอ (ทวิช, 2548)

ดังนั้นในการทำการคำนวณหาการวัดความหนืด โดยใช้หน่วยคุณลักษณะและใช้  $\rho, D, V$  หรือ  $(\rho, DV)$  เป็นตัวแปรพื้นฐานในการสร้างหน่วยวัดคุณลักษณะแล้วนั้น ได้พบว่าการวัดค่าความหนืดโดยทอนค่า  $\rho LV$  (ซึ่งเป็นหน่วยวัดคุณลักษณะของความหนืดนั่นเอง) ดังนั้นเราจึงวัดค่าตัวเลข  $\eta / \rho LV$  หรือหากเราจะวัดสัดส่วนกับของค่าเลขนี้ก็ย่อมได้ เพราะหากเราทราบค่าตัวหนึ่งก็จะทราบอีกค่าตัวหนึ่งเนื่องจากการสอดคล้องแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (one to one correspondence) ค่าส่วนกลับนี้  $(\rho DV / \eta)$  เรียกกันว่า “ค่าเลขเร โนลด์” (ซึ่งมักนิยมใช้สัญลักษณ์  $R_e$ ) ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นค่าเลขส่วนกลับของค่าความหนืด (ที่วัดด้วยหน่วยคุณลักษณะ) ดังนั้นค่านี้จะมีค่าสูงเมื่อความหนืด คุณลักษณะมีค่าต่ำ และมีค่าต่ำเมื่อความหนืดคุณลักษณะมีค่าสูง การที่ความหนืดคุณลักษณะมีค่าสูงก็แสดงว่ามี การต้านทานการไหลสูง เพราะโดยปกติของไหลที่มีความหนืดสูงกว่า เช่น กาวไหลยอมไหลได้ยากกว่าของไหลที่มีความหนืดน้อยกว่า เช่น น้ำ ถ้าการไหลจะออกนอกช่องทางก็จะถูกต้านด้วยแรงเสียดทานสูง ทำให้การไหลกลับมาอยู่ในช่องทางดั้งเดิม (แรงเสียดทานคุณลักษณะขึ้นอยู่กับค่าความหนืดคุณลักษณะ) ดังนั้นการไหลจึงมีระเบียบราบเรียบ (เพราะออกนอกช่องทางได้ลำบาก) ซึ่งเรียกกันว่า การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) แต่หากความหนืดคุณลักษณะมีค่าต่ำ (ค่าเลขเร โนลด์สูง) แรงฉุดการไหลและแรงต้านทานการออกนอกช่องทาง การไหลจะมีน้อย ของไหลจึงสามารถออกนอกช่องทางได้โดยง่าย การไหลก็กลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ในทางปฏิบัติและจากที่ยืนยันจากการทดลองในการไหลในรูปแบบหนึ่งจะมีค่าเลขเร โนลด์วิกฤตค่าหนึ่ง ซึ่งหากค่าเลขในการไหลจริงต่ำ

ว่านี่ก็จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ แต่หากค่าเลขสูงกว่านี้จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (แต่เป็นค่าเลขโดยประมาณ และขึ้นอยู่กับคุณลักษณะประกอบอื่น ๆ ด้วย) เช่น ในรูปแบบของการไหลในท่อ ค่าวิกฤตจะอยู่ที่ประมาณ 2,300 และการวัด  $R_e$  ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเป็นความยาวคุณลักษณะ และมักนิยมเขียนค่าเลขโรโนลด์ว่า  $R_{eD}$  ส่วนในการไหลบนแผ่นราบจะมีค่าเลขเรโนลด์วิกฤตประมาณ 500,000 และมักนิยมเขียนค่าเลขโรโนลด์ว่า  $R_{ex}$  เพราะใช้ระยะทาง ที่วัดจากขอบหน้า (leading edge) เป็นความยาวคุณลักษณะ (ทวิช, 2548)

พบว่าตัวดัชนีชี้บอกสภาพการไหลขึ้นอยู่กับความเร็วในการไหล ความหนืดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และค่าความหนาแน่นของ ของไหล (สมศักดิ์, 2540)

ถ้ากำหนดให้

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของ Fluid

$V$  คือ ความเร็วในการไหล

$D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

$\eta$  คือ ค่าความหนืดของของไหล

และ  $R_e$  คือ ค่า Reynolds number จะได้

$$R_e = \frac{VD\rho}{\eta} \quad (22)$$

$R_e$  เป็นค่าดัชนีไม่มีหน่วย (dimensionless)

### 2.3 อัตราการไหลของของไหล

หากมีแวนขยายอย่างตีที่สามารถส่องดู โมเลกุลของของไหลได้ (เช่น อากาศ และน้ำ) จะเห็นโมเลกุลจำนวนมากสาลวี่งพลา่่นไปมาอยู่ตลอดเวลา โมเลกุลตัวหนึ่งอาจจะกำลังวี่งไปในทิศทางหนึ่งด้วยความเร็วอันหนึ่ง แต่สักประเดี๋ยวกีจะวี่งไปชนโมเลกุลที่รายล้อมอยู่ ๆ (ซึ่งต่างก็กำลังเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วและทิศทางหนึ่งด้วยกันทั้งสิ้น) ระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลวี่งไปก่อนที่จะไปชนกับโมเลกุล

ข้างเคียงนี้เรียกว่า ระยะทางอิสระเฉลี่ย (mean free path) ซึ่งนิยามให้สัญลักษณ์เป็น  $\lambda$  ค่า  $\lambda$  จึงเปรียบเสมือนระยะห่างระหว่างโมเลกุล ในบรรยากาศปกติระยะห่างนี้มีขนาดระดับ 0.1 ไมครอน (หนึ่งในหมื่นของหนึ่งมิลลิเมตร) เท่านั้น และเนื่องจากอุปกรณ์ทางวิศวกรรมเช่น รถยนต์ กระจกสูบ ปัมป์น้ำ เครื่องบิน ปีกกังหันเทอร์ไบน์ เป็นต้น มีขนาดใหญ่ระดับ 10 เซนติเมตร ขึ้นไป อุปกรณ์เหล่านี้จึงใหญ่มากเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างโมเลกุล จนอาจถือเสมือนว่าอากาศ (หรือของไหลอื่นใด) ที่ไหลผ่านอุปกรณ์เหล่านี้มีระยะห่างระหว่างโมเลกุลเป็นศูนย์ หรืออีกนัยหนึ่งเป็นเนื้อเดียวกันอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีลักษณะของความเป็นเม็ด โมเลกุลหรือมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลเลย เหตุที่ต้องนำประเด็นนี้มาพิจารณาก็เพราะว่าในการศึกษากลศาสตร์ของไหลเชิงทฤษฎีนั้นเราจะต้องหาค่าอนุพันธ์ (derivative) ของพจน์ต่าง ๆ เสมอ เช่น  $dp/dx$  เมื่อ  $p$  เป็นความหนาแน่น และ  $x$  คือระยะทาง จะเห็นว่าในทางทฤษฎีนั้นต้องให้  $x$  เข้าหาศูนย์จึงจะได้อนุพันธ์ แต่หากให้เป็นจริงดังนั้นจะเห็นว่า เมื่อตอนที่  $x$  ผ่านเม็ดโมเลกุล ค่าอนุพันธ์ก็จะมีค่าสูงมาก แต่เมื่อ  $x$  อยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างโมเลกุลค่าอนุพันธ์ก็จะมีค่าเป็นศูนย์ (เพราะตรงนั้นเป็นช่องว่างที่ไม่มีเนื้อโมเลกุลเลย) หากเป็นดังนี้การศึกษาการไหลจะกระทำได้ยากมาก (ทวิช, 2548)

ของไหลในจินตนาการเป็นของไหลที่ไม่มีแรงเสียดทาน หรือ ไม่มีแรงหนืด (viscosity) นั่นเอง ดังนั้นถึงแม้ว่าของไหลนั้นจะกำลังเคลื่อนที่ก็ตาม แรงที่กระทำกับพื้นที่หน้าตัดใด ๆ จึงกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดนั้น ฉะนั้นแรงต่าง ๆ ที่กระทำกับก้อนของไหลจึงเป็นแรงที่เกิดจากความกดกัน แต่เพียงอย่างเดียว ของไหลที่ไม่มีแรงเสียดทานหรือไม่มีแรงหนืดเลยนั้นตามข้อเท็จจริงแล้วไม่มีอยู่ในโลก

สำหรับของไหลไม่ว่าจะเป็นของเหลวหรือแก๊สถ้าหากมีการเคลื่อนที่เกิดขึ้นแล้วก็ต้องมีแรงตามแนวสัมผัสหรือมีแรงเฉือนเกิดขึ้นด้วย เนื่องจากแรงเหล่านี้จะมีทิศทางสวนทางกับทิศทางเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานจากของไหลขึ้น แรงเสียดทานนี้เกิดจากคุณสมบัติอย่างหนึ่งของของไหลที่เรียกว่า ความหนืด (สุนันท์, 2548)

ของไหลเป็นสสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมากแต่จับตัวกันอย่างหลวม ๆ ไม่เหมือนกับของแข็ง ของไหลจะเปลี่ยนรูปไปตามภาชนะที่ใส่ หรือเปลี่ยนรูป (เสียรูป) ไปตามแรงภายนอกที่กระทำ ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมของของไหล เราจะวิเคราะห์โดยสมมุติให้ของไหลนั้นมีค่าของ

คุณสมบัติต่าง ๆ อยู่ในสภาวะต่อเนื่อง สมมุติฐานดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับทฤษฎีของขีดจำกัดที่จะกำหนดว่า จุดหรืออนุภาคในของไหลจะมีขนาดเล็กที่สุดเท่าใดที่ยังมีคุณสมบัติเป็นสภาพต่อเนื่อง กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ปริมาตรของอนุภาคของสสารหรือจุดในของไหลที่มีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถนำมาวิเคราะห์ให้เป็นไปตามทฤษฎีสภาพต่อเนื่องนั้น จะต้องมีความใหญ่พอเพียงที่จะมีจำนวนโมเลกุลของสสารรวมอยู่มากพอที่จะกล่าวได้ว่า ผลของโมเลกุลเมื่อรวมกันแล้ว สามารถเฉลี่ยให้ค่าคุณสมบัติของสสารนั้นมีค่าสม่ำเสมอจนไม่มีผลของช่องว่างของแต่ละโมเลกุลเกิดขึ้น ดังนั้น คุณสมบัติของของไหลที่จุด ๆ หนึ่งที่มีสภาพต่อเนื่องจะถูกสมมุติให้มีความใหญ่พอที่คุณสมบัติดังกล่าวจะถูกกำหนดให้มีค่าที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องของตำแหน่งและเวลา (สมศักดิ์, 2552)

## 2.4 การไหลในทรงกระบอก

สามารถคำนวณหาอัตราการไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด ในท่อทรงกระบอก เมื่อพิจารณาอัตราการไหลดังนี้

$$Q = \int_s (u \cdot n) dS \quad (12)$$

ใช้พิกัดทรงกระบอกตามสมการ  $dS = r dr d\theta$  เมื่อ  $n = e_z$  และ  $u = v_z(r) e_z$  นำสมการที่ (7) แทนลงในสมการที่ (12) ได้

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{R^2 (p_1 - p_2)}{4\eta L} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] r dr d\theta \quad (13)$$

อินทิเกรตสมการที่ (13) ได้ผลเฉลย

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \left( \frac{p_1 - p_2}{L} \right) \quad (14)$$

เมื่ออัตราส่วน  $\frac{p_1 - p_2}{L}$  เรียกว่า pressure gradient

อัตราการไหลของของไหล จึงแปรผกผันกับความหนืดของของไหล แต่แปรผันตรงกับกำลังสี่ของรัศมีท่อ และ pressure gradient ความสัมพันธ์นี้ Poiseuille เป็นผู้ค้นพบคนแรก จึงเรียกสมการที่ (14) นี้ว่า Poiseuille's Law ความดันของของไหลที่มีความหนืดซึ่งไหลผ่านท่อ จึงมีค่าลดลง แม้ว่าท่อจะอยู่ในแนวระดับและมีขนาดคงที่ (Cutnnett and Jhonson, 2010)

แทนค่า  $R = \frac{D}{2}$  ลงในสมการที่ (14) ได้

$$Q = \frac{\pi D^4 (p_1 - p_2)}{128 \eta L} \quad (15)$$

ความเร็วสูงสุดคือ

$$V_{\max} = \frac{R^2 (p_1 - p_2)}{4 \eta L} \quad (16)$$

เนื่องจาก  $\bar{V} = Q / A = 4Q / \pi D^2$

$$\bar{V} = \frac{D^2 (p_1 - p_2)}{32 \eta L} \quad (17)$$

จากสมการที่ (17) ได้ผลต่างของความดัน

$$p_1 - p_2 = \frac{32 \eta \bar{V} L}{D^2} \quad (18)$$

จากสมการที่ (18) แทนค่าในเทอมของความเร็ว

$$p_1 - p_2 = \frac{128 \eta Q L}{\pi D^4} \quad (19)$$

จากสมการที่ (19) ความหนืดในของไหล ที่ไหลผ่านท่อทรงกระบอกสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\eta = \frac{\pi D^4 (p_1 - p_2)}{128 Q L} \quad (20)$$

ถ้าหากลมมุมปากทางเข้าของท่อที่ต่อจากถังเก็บน้ำขนาดใหญ่ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวน ถ่าน้ำที่ไหลเข้าสู่ท่อแล้ว อนุภาคของของไหลทั้งหมดก็จะเริ่มเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เท่า ๆ กัน ยกเว้น ชั้นที่ติดอยู่กับผิวของท่อหรืออนุภาคที่ติดจากผนังของท่อเท่านั้นที่ความเร็วเป็นศูนย์ เมื่อยกเว้นชั้นของไหลดังกล่าวแล้วของไหลที่ปากทางเข้าของท่อก็จะมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด เมื่อมีการไหลเกิดขึ้นของไหลส่วนที่อยู่ใกล้ผิวท่อก็จะถูกความเสียดทานจากผิวท่อหน่วงให้ไหลช้าลงและถ้าหากของไหลมีอัตราการไหลคงที่แล้ว ความเร็วของของไหลที่กลางท่อในหน้าตัดที่อยู่ถัด ๆ ไปก็จะต้องถูกเร่งให้เร็วขึ้นจนกระทั่งเส้นแสดงลักษณะการกระจายความเร็วเป็นรูปพาราโบลา (ทวิช, 2548) ตามทฤษฎีนั้นตำแหน่งของเส้นแสดงลักษณะการกระจายความเร็วที่เป็นรูปพาราโบลานั้นจะอยู่ห่างจากปากท่อเป็นระยะทาง Infinity แต่จากทฤษฎีและการสังเกตกลับปรากฏว่าความเร็วกลางท่อที่มีค่าเป็นร้อยละ 99 ของความเร็วสูงสุดเมื่อเป็นรูปพาราโบลานั้นอยู่ที่ตำแหน่ง

$$L' = 0.058R_e - D \quad (21)$$

ดังนั้นเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤต  $R_e = 2,000$  แล้วระยะ  $L'$  ดังภาพที่ 7 ก็จะเท่ากับ 116 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำกว่าค่าวิกฤตนั้นระยะ  $L'$  ก็จะสั้นลง



ภาพที่ 7 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวยาวของท่อเมื่อไหลแบบราบเรียบ

ที่มา: ทวิช (2548)

ในบริเวณของช่วง  $L'$  นั้นลักษณะการไหลจะเป็นแบบ unestablished flow ซึ่งหมายความว่า เส้นแสดงลักษณะการกระจายของความเร็วยังอยู่ในช่วงที่กำลังเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่าของไหลดังกล่าวนี้ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแกนกลางที่ไม่มีผลกระทบจากความเสียดทานกับส่วนที่เป็นรูปร่างแหวนที่อยู่ถัดออกมาจากแกนกลางไปยังผิวท่อ ความหนาของส่วนที่เป็นวงแหวนนี้จะเพิ่มขึ้นตามระยะที่วัดจากปากท่อ เราเรียกส่วนที่ถัดจากแกนกลางซึ่งเป็นรูปร่างแหวนนี้ว่า boundary layer ความหนืดใน boundary layer นี้จะทำการถ่ายทอดผลกระทบของ boundary shear เข้าไปในของไหลจะพบว่า boundary layer จะโตจนกระทั่งเต็มท่อบริเวณที่หน้าตัดของท่อ AB ในกรณีที่เป็นการไหลแบบราบเรียบนั้น เส้นแสดงลักษณะการกระจายของความเร็วพื้นที่หน้าตัดของท่อ AB จะเป็นรูปพาราโบลาอย่างสมบูรณ์ สำหรับเส้นแสดงลักษณะการกระจายของความเร็วในหน้าตัดที่ถัดจาก พื้นที่หน้าตัดของท่อที่อยู่ในตำแหน่งที่พิจารณาไปนั้นจะมีรูปร่างคงเดิม เราเรียกการไหลช่วงนี้ว่า established flow (ทวิช, 2548)

ในกรณีของท่อกลม พลังงานจลน์ของน้ำที่ความเร็วกระจายเป็นรูปพาราโบลาจะมีค่าเป็น  $2V^2/2g$  เมื่อ  $V$  เป็นความเร็วเฉลี่ย เนื่องจากความเร็วของของไหลที่บริเวณปากท่อนั้นมีขนาดสม่ำเสมอเท่ากับ  $V$  ตลอดพื้นที่หน้าตัด ยกเว้นของไหลชั้นบาง ๆ ที่ติดกับผิวท่อเท่านั้น ดังนั้นพลังงานจลน์ของของไหลจำนวนหนึ่งหน่วยน้ำหนักที่บริเวณปากท่อจะมีค่าเป็น  $V^2/2g$  ด้วยเหตุนี้เองพลังงานจลน์ของของไหลในช่วง  $L'$  ก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นพร้อมกับ pressure head ที่ลดน้อยลง ดังนั้นตรงหน้าตัดที่ห่างจากปากท่อเป็นระยะทาง  $L'$  ก็จะมี pressure head ต่ำกว่า static head เท่ากับ  $2V^2/2g$  บวกกับ head loss ในช่วงความยาวนั้น (ทวิช, 2548)

## 2.5 คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasound waves)

การนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ในอุตสาหกรรมนั้นมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะการวัดอัตราการไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งมีพิสัยการวัดที่กว้างได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ เช่น การวัดอัตราการไหลของก๊าซที่มีความดันสูง การวัดกระจายตัวของก๊าซ ระบบเปิด-ปิดก๊าซเมื่อตรวจสอบการคิดไฟของก๊าซ การวัดความสะอาดและสกปรกในของไหล การวัดอัตราการไหลของร่อนน้ำและแม่น้ำ การวัดอัตราการไหลของอากาศ ฯลฯ ซึ่งได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้

ประโยชน์เพิ่มขึ้นอย่างหลากหลาย อาทิ เช่น การวัดอัตราการไหลแบบเดิมๆ ถูกแทนที่ด้วยการวัดการไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Raj และคณะ, 2007)

คลื่นเหนือเสียงหรือคลื่นอัลตราโซนิกหรืออัลตราซาวนด์ เป็นคลื่นกลที่มีความถี่ 20 kHz ขึ้นไป ซึ่งเป็นขีดจำกัดของการได้ยินทางด้านความถี่สูงจนถึงประมาณ 600 MHz คลื่นเหนือเสียงจึงเป็นเสียงเงียบ คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ 600 MHz มีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ  $5 \times 10^{-7}$  เมตร ซึ่งมีค่าพอ ๆ กับความยาวคลื่นของแสงในอากาศ ความยาวคลื่นที่สั้น ทำให้สามารถบีบลำคลื่นของคลื่นเหนือเสียงให้แคบลงได้มาก เมื่อผ่านสิ่งกีดขวางหรือช่องเปิดที่ส่วนใหญ่มีขนาดโตกว่าความยาวคลื่นของคลื่นเหนือเสียงมาก การเลี้ยวเบนของลำคลื่นของคลื่นเหนือเสียงจะเกิดขึ้นน้อยมาก

คลื่นเหนือเสียงนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น การสะท้อนของคลื่นเหนือเสียง นำมาใช้ในการวัดความลึกของทะเลหรือมหาสมุทร หาตำแหน่งของวัตถุใต้น้ำ (เรือดำน้ำ ผู่ปลา) การตรวจและวินิจฉัยโรค การสื่อสารต้นน้ำระหว่างเรือเดินทะเล ความยาวของคลื่นที่สั้นทำให้คลื่นเหนือเสียงเหมาะสำหรับใช้ตรวจหาวัตถุเล็ก ๆ หรือตรวจหารอยบกพร่องเล็ก ๆ ภายในวัตถุ ตัวอย่างการใช้ประโยชน์เหล่านี้ เป็นการใช้คลื่นเหนือเสียงเป็นตัวกลางในการตรวจหาข้อมูล ทำนองเดียวกับการใช้ประโยชน์จากไฟฟ้าในลักษณะของไฟฟ้าสื่อสาร ความถี่ที่สูงทำให้อนุภาคตัวกลางที่คลื่นเหนือเสียงเคลื่อนผ่านต้นด้วยความถี่สูง การสั่นสะเทือนนี้นำไปใช้ในการทำให้เกรน (เมล็ดผลึก) ของโลหะเล็กลง ผลจากการสั่นด้วยความถี่สูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วและอาจมีความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน เช่น การเชื่อมพลาสติก การทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงตัวอย่างการใช้ประโยชน์ ในกรณีหลังนี้อาศัยพลังงานที่เกิดจากคลื่นโดยตรงทำนองเดียวกับการนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ในลักษณะของไฟฟ้ากำลัง (สุชาติ, 2544)

พลังงานอันเกิดจากคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้นั้นจะต้องมีค่าเกินกว่า  $0.1 \text{ W} / \text{cm}^2$  แม้ว่าพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้กับการทดลองแบบไม่ทำลาย หรือใช้ในทางการแพทย์นั้นจะมีค่าต่ำกว่า  $0.1 \text{ mW} / \text{cm}^2$  ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องห่วงว่าคลื่นอัลตราโซนิกจะมีผลร้ายต่อร่างกายอย่างไร (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2543)

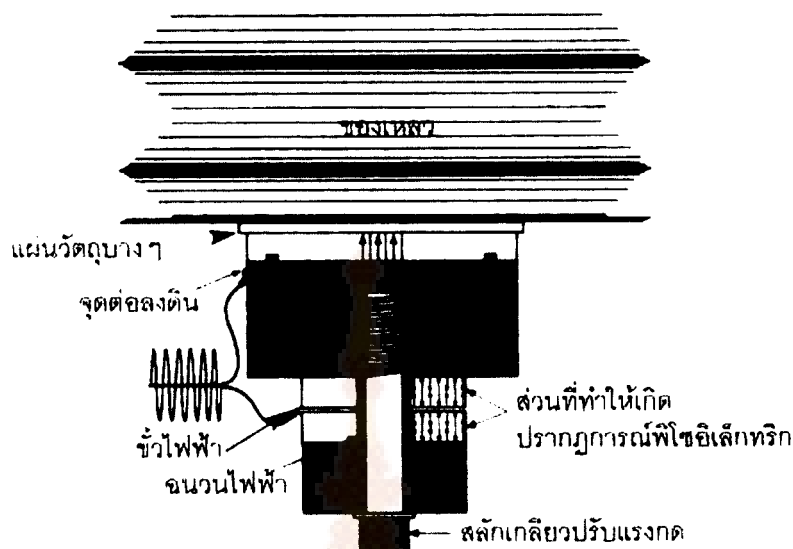
## 2.6 อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์

ทรานสดิวเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายทอดพลังงานจากระบบหนึ่งเข้าสู่อีกระบบหนึ่ง โดยส่วนมากจะเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานจากพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ก่อนที่จะถ่ายทอดพลังงานระหว่างระบบ

อัลตราโซนิค ทรานสดิวเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายทอดพลังงานระหว่างระบบ โดยเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กหรือพลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานกลของการสั่นเชิงกลในย่านความถี่ของคลื่นเหนือเสียง หรือในทางกลับกัน คือ เปลี่ยนพลังงานกลจากการสั่นเชิงกลในย่านความถี่ของคลื่นเหนือเสียง เป็นพลังงานแม่เหล็กหรือพลังงานไฟฟ้า อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมาก ในการนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้ประโยชน์

อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ ที่ใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ทำให้เกิดการสั่นเชิงกลด้วยพลังงานแม่เหล็ก (magnetostrictive transducers) (สุชาติ, 2544) กับแบบที่ทำให้เกิดการสั่นเชิงกลด้วย พลังงานไฟฟ้า (piezoelectric transducers) อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ทั้งสองแบบนี้ ทำงานเหมือนกัน คือ เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นพลังงานกลของการสั่น แต่ใช้วิธีการที่แตกต่างกัน

อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ แบบทำให้เกิดการสั่นเชิงกลด้วยพลังงานไฟฟ้า ทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นพลังงานกลของการสั่น โดยตรง จากผลของปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) จึงนิยมเรียกกันว่า พิโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริก เป็นปรากฏการณ์ที่วัตถุบางชนิดมีขนาดเปลี่ยนไป เมื่อได้รับประจุไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า หรือในทางกลับกัน การทำให้ขนาดของวัตถุบางชนิดเปลี่ยนไป (ยุบและขยายตัว) ด้วยพลังงานกล จะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าขึ้น พิโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ มีส่วนประกอบหลักดังภาพที่ 8 (สุชาติ, 2544)



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบหลักของพิโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

ที่มา: สุชาติ (2544)

พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ย่านคลื่นเหนือเสียงจากเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่จ่ายไปยังทรานสดิวเซอร์ทำให้สารพิโซอิเล็กทริกในทรานสดิวเซอร์สั่น การสั่นนี้จะได้รับการขยายด้วยความถี่เรโซแนนซ์หรือความถี่ธรรมชาติในการสั่นของมวลของทรานสดิวเซอร์ (มวลของทรานสดิวเซอร์จะมีค่าพอเหมาะที่จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ของคลื่นที่ความถี่ต้องการ) แล้วถ่ายทอดการสั่นออกไปทางแผ่นวัสดุบางๆ ดังแสดงในภาพที่ 8 สำหรับการใช้งานในเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง การสั่นนี้จะถ่ายทอดเข้าสู่ของเหลวโดยตรง (สุชาติ, 2544)

## 2.7 กลไกการเกิด Cavitation

คลื่นเหนือเสียงจากชุดของทรานสดิวเซอร์ที่ส่งผ่านไปของเหลวที่บรรจุอยู่ในเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง ทำให้เกิดส่วนอัดและส่วนขยายขึ้นในของเหลว ขณะที่เกิดส่วนขยายของเหลวจะแยกตัวออกเกิดเป็นฟองเล็กๆ (มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น) ขึ้น ฟองเหล่านี้จะขยายออกจนมีขนาดโตที่สุด เมื่อความดันในของเหลวลดลงสู่ความดันปกติ ความดันจากส่วนอัดที่เกิดตามมา ทำให้

ฟองเหล่านี้ยุบตัวลงอย่างรวดเร็ว และเกิดการระเบิด ส่งคลื่นกระแทกที่รุนแรงออกไป ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “แควิเทชัน” ขณะที่ฟองเหล่านี้ขยายตัวและยุบตัว แก๊สที่ละลายอยู่ในของเหลวจะแพร่ผ่านเข้าและออกจากฟองเหล่านี้ตลอดเวลา การยุบตัวและการระเบิดของฟองจำนวนมากมาย ทำให้เกิดเป็นลำของเหลวที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูง อุณหภูมิและความดันในบริเวณที่เกิดแควิเทชันอาจจะสูงถึง  $5000^{\circ}\text{C}$  และ 600 เท่าของความดันบรรยากาศปกติ ตามลำดับหรือสูงกว่า (จากการคำนวณ) อุณหภูมิที่สูงมากประกอบกับการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงของลำของเหลว (ผลจากการเกิดคลื่นกระแทก) ทำให้สิ่งสกปรกที่ติดอยู่กับวัตถุที่ต้องการทำความสะอาดซึ่งจมอยู่ในของเหลวหลุดไป และใช้เป็นกระบวนการฆ่าเชื้อโรคได้แบบหนึ่ง (โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย) แต่อุณหภูมิของเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง ขณะใช้งานไม่สูงนัก เนื่องจากการขยายตัวและยุบตัวของฟองเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นมาก ของเหลวบริเวณรอบ ๆ ฟองเหล่านี้ จะดูดกลืนความร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิของบริเวณที่เกิดแควิเทชันลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิของถังบรรจุของเหลวและของเหลวจึงไม่สูงมากเพียงอุ่น ๆ เท่านั้น ในระหว่างการใช้งานเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง

ประสิทธิภาพของการทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง นอกจากเวลา อุณหภูมิ และสิ่งตกค้างทางเคมีที่เป็นตัวแปรสำคัญในการทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง เช่นเดียวกับการทำความสะอาดด้วยวิธีอื่นแล้ว ยังมีตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง โดยเฉพาะตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดแควิเทชันในของเหลว

อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด ต่อการเกิดแควิเทชัน เพราะสมบัติหลายประการของของเหลวที่มีผลต่อการเกิดแควิเทชัน เช่น ความหนืด ปริมาณแก๊สที่ละลายอยู่ในของเหลว อัตราการแพร่ของแก๊สที่ละลายอยู่ในของเหลว และความดันไอ ล้วนเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของของเหลวทั้งสิ้น ในน้ำบริสุทธิ์ ปรากฏการณ์แควิเทชันจะมีความเข้มสูงสุดเมื่อน้ำมีอุณหภูมิประมาณ  $160^{\circ}\text{F}$  หรือประมาณ  $71^{\circ}\text{C}$  (สุชาติ, 2544)

ความดันเป็นค่าตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่ง ค่าของตัวแปรอื่นๆในระบบ (process measurement) สามารถวัดได้ในรูปของความดันทั้งสิ้น เช่น การวัดอัตราการไหลแบบใช้ตัววัดลักษณะออริฟิซทำให้เกิดค่าความดันดิฟเฟอเรนเชียล การวัดระดับของของเหลวในภาชนะ โดยใช้หลักการวัด

ความดันดิวเฟอเรนเชียล ที่เกิดจากสแตติกเฮด (static head) และการวัดอุณหภูมิแบบเดิมของเหลวใน  
กระเปาะ (filled thermal) เปลี่ยนค่าอุณหภูมิเป็นความดันก่อนแล้วอ่านอุณหภูมิในรูปของความดัน

ความดัน หมายถึง แรงที่กระทำอย่างสม่ำเสมอในแนวตั้งฉากบนพื้นที่ที่กำหนด ถ้า  
กำหนดให้  $F$  คือแรงที่กระทำ,  $A$  คือพื้นที่ที่ถูกกระทำ,  $P$  คือ ความดันที่เกิดขึ้นจะได้(สมศักดิ์, 2540)

$$P = \frac{F}{A} \quad (23)$$

แรงที่กระทำอาจเกิดจากของเหลว (liquids) ก๊าซ หรือของแข็ง (solids) ก็ได้

ของเหลวมีมวลหนาแน่นกว่าก๊าซมาก ในทางปฏิบัติถือว่าของเหลวเป็นสารที่อัดตัวไม่ลง  
(incompressible) ถ้าเปรียบเทียบกับก๊าซแล้ว ก๊าซเป็นสารที่อัดตัวลง (compressible) เมื่อของเหลวถูก  
บรรจุอยู่ในภาชนะ โมเลกุลของของเหลวจะทับถมกันลงไปเรื่อย ๆ จากบนลงสู่ล่างทำให้ความดัน  
เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามขนาดความสูงของของเหลวนั้น

ความดันที่เกิดจากของเหลวลักษณะนี้เรียกว่า สแตติกเฮด (static head) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าเฮด  
(head) ถ้ากำหนดให้

$P$  คือ ความดันของเหลว มีหน่วยเป็น bar

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว มีหน่วยเป็น  $kg/m^3$

$h$  คือ ความสูงของของเหลว มีหน่วยเป็น m

และ  $g$  คือ แรงโน้มถ่วง มีหน่วยเป็น  $m/s^2$

จะได้

$$P = \rho gh \quad (24)$$

## 2.8 การวัดอัตราการไหลของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

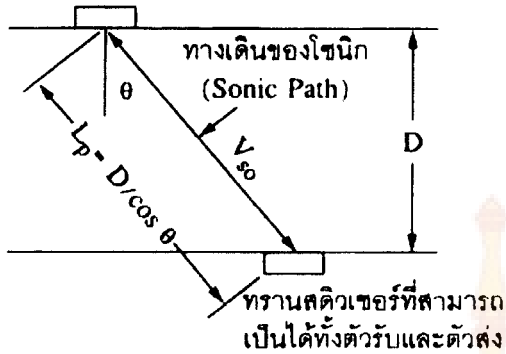
อัลตราโซนิก มีหลักการวัด อัตราการไหล โดยอาศัยคลื่นความถี่เหนือเสียง มีอยู่หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบ Counterpropagating และ แบบ Doppler สำหรับของไหล ที่มีสารแขวนลอยปะปนอยู่ด้วยเพื่อใช้เป็นตัวสะท้อนคลื่น

### แบบ Counterpropagating

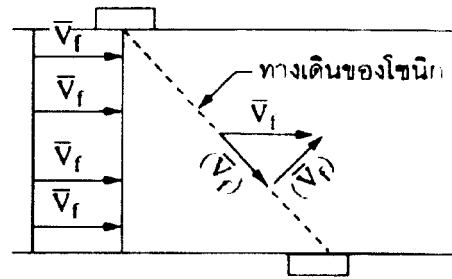
การวัดอัตราการไหล โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ สองตัวซึ่งจะถูกนำไปวางประกบกับเนื้อท่อทางด้านนอก คลื่นอัลตราโซนิกจะถูกส่งจากทรานสดิวเซอร์ ตัวที่ 1 ไปยังตัวที่ 2 ( $t_1$ ) และกลับกันจากตัวที่ 2 ไปตัวที่ 1 ( $t_2$ ) ในกรณีที่ของเหลวภายในท่อ ไม่มีการเคลื่อนที่ หรืออัตราการไหลเป็นศูนย์ จะสังเกตได้เมื่อทรานสดิวเซอร์ ทั้งสองตัวนี้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเดียวกัน ถูกส่งออกไปและใช้ระยะทางในการเคลื่อนที่เท่ากัน ผลที่ได้คือ ความเร็ว และเวลาในการเคลื่อนที่เท่ากัน ดังนั้นผลต่างของเวลาในการเคลื่อนที่ ( $\Delta t$ ) จะเท่ากับศูนย์ซึ่งผลต่างของเวลาในการเคลื่อนที่นี้จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งจะได้ความเร็วของของไหลเป็นศูนย์ แต่ในกรณีที่ของเหลวมีการเคลื่อนที่ จากทรานสดิวเซอร์ ตัวที่ 1 ไปยังตัวที่ 2 จะสังเกตได้ว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นในของเหลว จะสัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นในของเหลว (ปัญญา, 2538)

สามารถกำหนดค่า อัตราการไหล ได้โดยอาศัยหลักความแตกต่างของความเร็วในการเดินทางของคลื่นความถี่เหนือเสียง โดยความเร็วจะมากขึ้นเมื่อทิศทางการไหลและทิศทางของคลื่นความถี่เป็นไปในทางเดียวกัน และจะลดลงเมื่อทิศทางกลับกัน ด้วยผลต่างของช่วงเวลาทั้งสอง จึงสามารถกำหนดความเร็วในการไหลของ ของไหลในท่อ ได้พิจารณาตามภาพที่ 9 (สมศักดิ์, 2540)

ทรานสดิวเซอร์ที่สามารถเป็นตัวรับและตัวส่ง



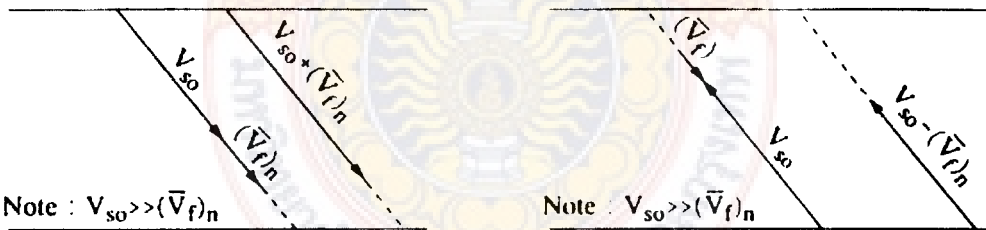
(ก) เมื่อไม่มีการไหล



(ข) ทิศทางของโซนิคขนานไปกับการไหล

ภาพที่ 9 หลักการทำงานของแบบ Counterpropagating

ที่มา: สมศักดิ์ (2540)



(ค) ช่วงที่คลื่นอัลตราโซนิคเดินทางตามกระแสการไหล (ง) ช่วงที่คลื่นอัลตราโซนิคเดินทางสวนทางกับการไหล

ภาพที่ 10 ช่วงที่คลื่นอัลตราโซนิคเดินทางตามและสวนกระแสการไหล

ที่มา: สมศักดิ์ (2540)

ถ้ากำหนดให้ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคือ  $D$  เมื่อติดตั้งตัวรับและตัวส่งด้านล่าง และด้านบนเอียงกันดังภาพที่ 10 ระยะที่คลื่นจะเดินทางจากตัวส่งถึงตัวรับจึงเท่ากับ  $D/\cos\theta$  เรียกย่อว่า  $L_p$  ความเร็วในการเดินทางของคลื่นจากตัวส่งถึงตัวรับเป็น  $V_{SO}$  เมื่อ ของไหล ไหลอยู่ในท่าด้วยความเร็ว  $V_f$  การทำงานของ Flow meter กำหนดให้ทรานสดิวเซอร์ทั้งสองตัวสลับกันเป็นตัวรับและตัวส่ง จากทฤษฎีดังกล่าวข้างต้น เมื่อทรานสดิวเซอร์ด้านบนเป็นตัวส่งความเร็วของของไหลและคลื่นความถี่จะเสริมกัน ทำให้ความเร็วรวมเป็น  $V_{SO} + V_f$  และเมื่อทรานสดิวเซอร์ตัวล่างเป็นตัวส่งความเร็วของของไหลในท่อและคลื่นความถี่จะหักล้างกัน ทำให้ได้ความเร็วรวมเป็น  $V_{SO} - V_f$  เขียนเป็นสมการดังนี้

ช่วงเวลาที่ทรานสดิวเซอร์ด้านบนส่งถึงตัวล่าง

$$t_{dn} = \frac{L_p}{V_{SO} + V_f \cos\theta} \quad (25)$$

ช่วงเวลาที่ทรานสดิวเซอร์ตัวล่างส่งถึงด้านบน

$$t_{up} = \frac{L_p}{V_{SO} - V_f \cos\theta} \quad (26)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 1 และ 2 จะได้

$$\frac{1}{t_{dn}} - \frac{1}{t_{up}} = \frac{t_{up} - t_{dn}}{t_{up} \cdot t_{dn}} = \frac{2V_f \cdot \cos\theta}{L_p} \quad (27)$$

จะได้

$$V_f = \frac{L_p}{2\cos\theta} \left( \frac{t_{up} - t_{dn}}{t_{up} \cdot t_{dn}} \right) \quad (28)$$

ค่า Flow ที่วัดเป็นปริมาตร

$$Q = AV_f = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{L_p}{2\cos\theta} \left( \frac{t_{up} - t_{dn}}{t_{up} \cdot t_{dn}} \right) \quad (29)$$

เมื่อ  $L_p = \frac{D}{\cos\theta}$  ดังนั้น

$$Q = AV_f = \frac{\pi D^3}{8(\cos\theta)^2} \left( \frac{t_{up} - t_{dn}}{t_{up} \cdot t_{dn}} \right) \quad (30)$$



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

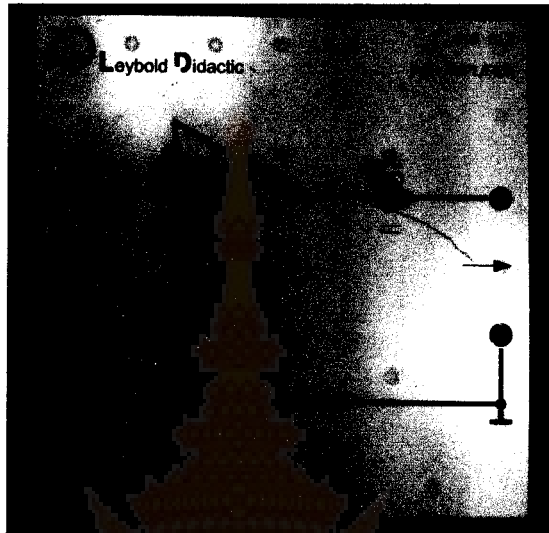
#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

##### 3.1.1 หัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ แบบ piezoelectric 40k Hz



ภาพที่ 11 หัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ แบบ piezoelectric 40k Hz

### 3.1.2 AC-amplifier รุ่น LEYBOLD 416010



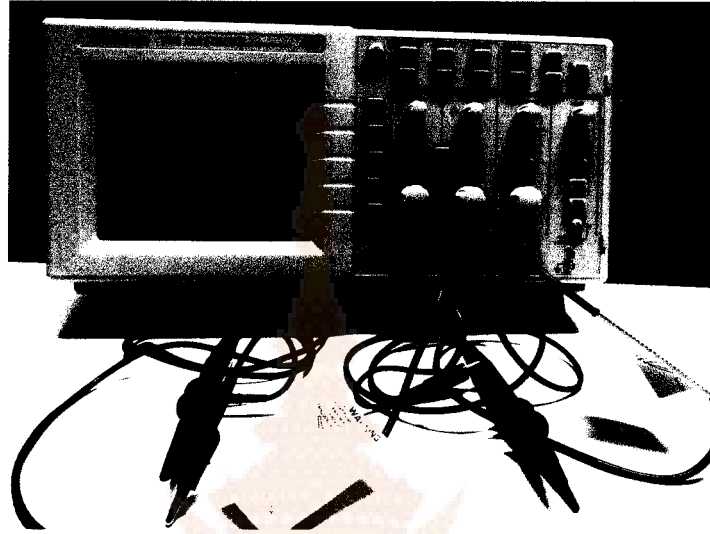
ภาพที่ 12 AC-amplifier รุ่น LEYBOLD 416010

### 3.1.3 Function generator รุ่น Tektronix AFG 3021B



ภาพที่ 13 Function generator รุ่น Tektronix AFG 3021B

### 3.1.4 ออสซิลโลสโคป รุ่น Tektronix TDS 1012



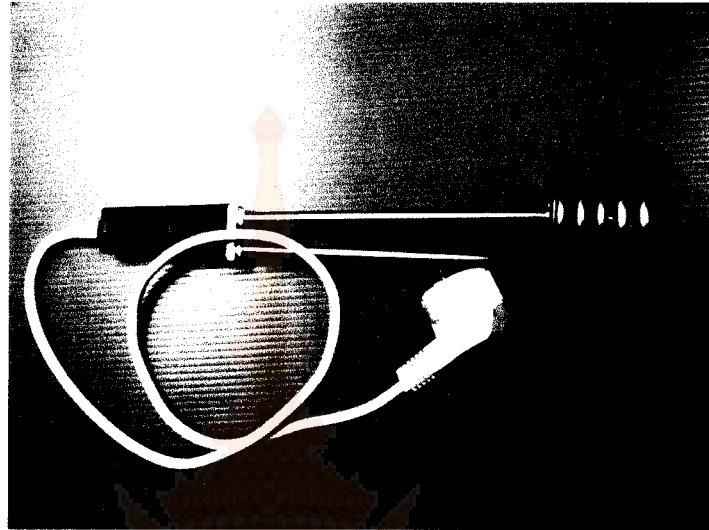
ภาพที่ 14 ออสซิลโลสโคป รุ่น Tektronix TDS 1012

### 3.1.5 มัลติมิเตอร์ รุ่น Extech 410



ภาพที่ 15 มัลติมิเตอร์ รุ่น Extech 410

### 3.1.6 ฮีตเตอร์ รุ่น pcospec 105 ขนาด 1,000 วัตต์



ภาพที่ 16 ฮีตเตอร์ รุ่น pcospec 105 ขนาด 1,000 วัตต์

### 3.1.7 ท่อพีวีซี

### 3.1.8 คอมพิวเตอร์

### 3.1.9 ถังรองน้ำ ถังพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.42 เมตร สูง 0.59 เมตร

### 3.1.10 ฝาปิดปลายท่อ

### 3.1.11 น้ำ

### 3.1.12 ถังพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 เมตร สูง 0.30 เมตร

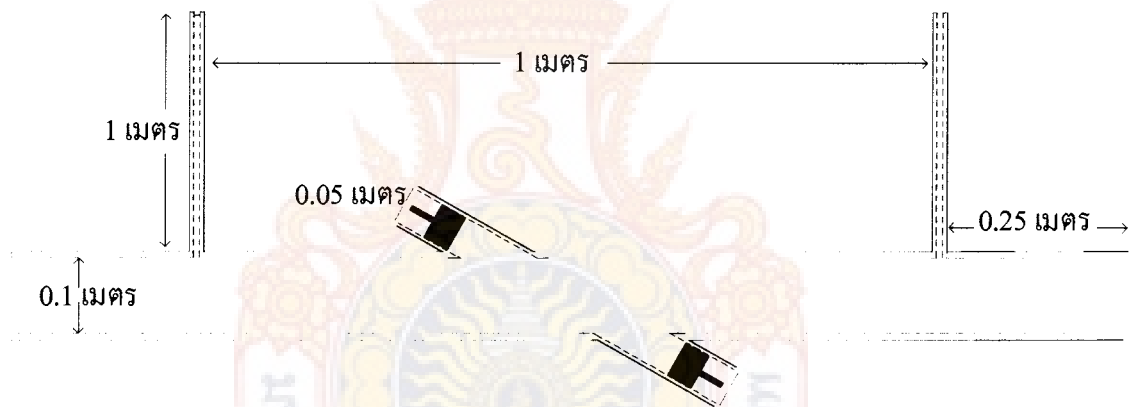
### 3.2 วิธีการ

#### 3.2.1 สร้างชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

##### 3.2.1.1 ออกแบบชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ในการออกแบบและสร้างชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนั้น ผู้วิจัยทำการกำหนดขนาดและแบบท่อที่เหมาะสม โดยทดลองท่อ 2 แบบ คือ

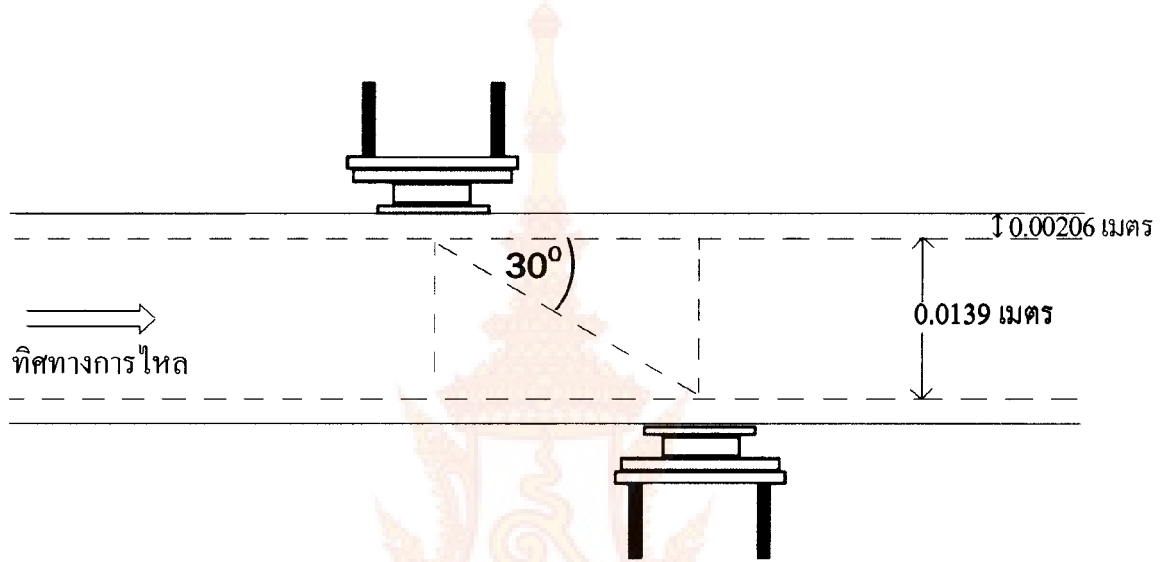
แบบที่ 1 คือท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.1 เมตร ยาว 1.5 เมตร เชื่อมต่อเข้ากับถังบรรจุน้ำของเหลว ขนาด 120 ลิตร ติดอุปกรณ์หัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์หัวรับและหัวส่งเข้าภายในท่อโดยการเจาะท่อนำหัวรับและหัวส่งทรานสดิวเซอร์ วางท่ามุมระหว่างกัน 30 องศา ภายในท่อ และได้ติดตั้งปั้มน้ำให้ป้อนน้ำไหลกลับมาทดแทนน้ำที่ไหลออกไปจากถังบรรจุน้ำ ส่วนการวัดความดันนั้น ได้ใช้หลักการแบบมานอมิเตอร์ (Cengel และคณะ, 2006) ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แบบท่อแบบที่ 1

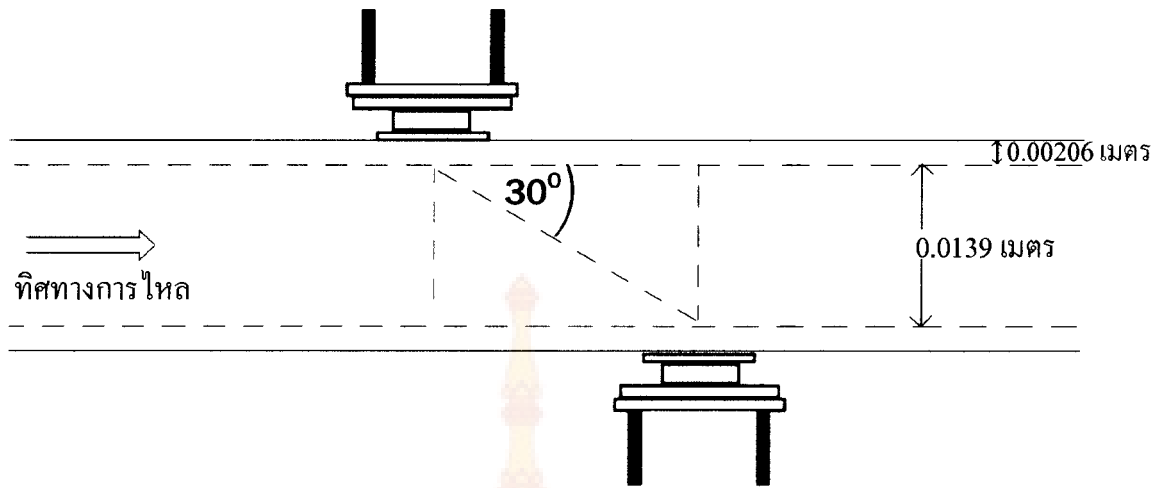
แบบที่ 2 กำหนดขนาดและแบบโดยคำนวณจากสมการของ Reynolds number ดังแสดงในภาคผนวก ก (สมศักดิ์, 2540) โดยท่อแบบที่ 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0139 เมตร หนา 0.00206 เมตร ยาว 5 เมตร ปลายท่อมีฝาเปิด-ปิดน้ำ ถึงสูง 0.3 เมตร แนวการเจาะถึงวัดจากกันถึงขึ้นมาเป็นระยะ 0.225 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของท่อ เจาะถึงเชื่อมเข้ากับท่อ โดยท่อน้ำวางตามแนวราบ ยึดติดกับแคลมป์ รัศมีท่อด้วยสายรัดจัดท่อให้อยู่ในแนวระดับเดียวกันตลอดทั้งเส้น โดยใช้ไม้วัดระดับน้ำ นำถังมารองน้ำด้านปลายท่อ ติดตั้งหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ 2 หัวให้อยู่ระหว่างกลางท่อ ใช้ function generator สร้างสัญญาณความถี่ 40 kHz ให้กับหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ หัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบ่งเป็นภาครับ-ส่งสัญญาณ เพื่อหา  $t_{up}$  (เวลาที่ส่งคลื่นอัลตราโซนิกทวนกระแส

การไหลของน้ำ) และ  $t_{down}$  (เวลาที่ส่งคลื่นอัลตราโซนิกตามกระแสการไหลของน้ำ) หัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ 2 หัว ทำมุมระหว่างกัน 30 องศา ส่งคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางคือน้ำจะมีระยะทางเป็นสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ส่วนการวัดความดันใช้การคำนวณจากสมการที่ (24) แล้วเชื่อมต่อหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์เข้ากับอุปกรณ์ชุดขับสัญญาณต่อเข้าออสซิลโลสโคปและคอมพิวเตอร์ ดังแสดงแบบท่อในภาพที่ 18

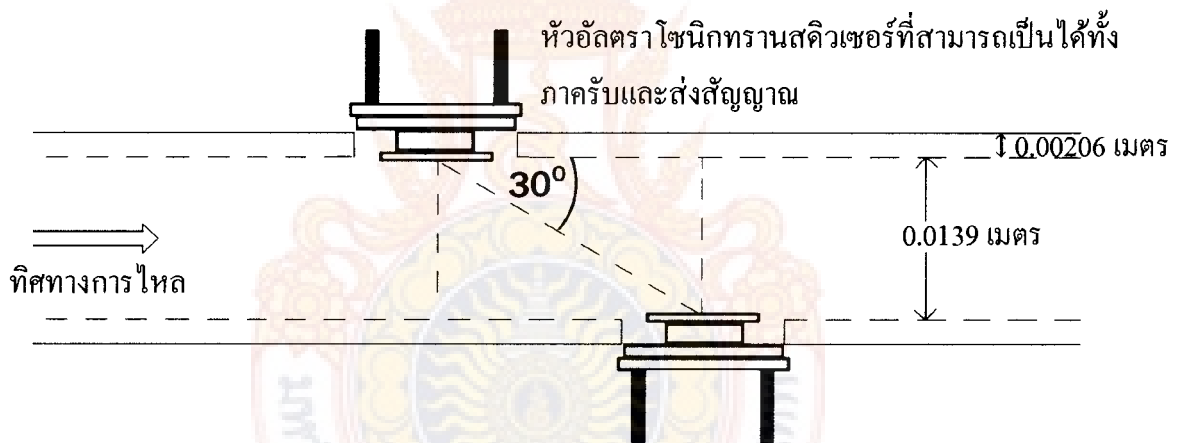


ภาพที่ 18 แบบท่อแบบที่ 2

จากนั้นจึงศึกษาวิธีการส่งสัญญาณอัลตราโซนิกใน 2 ลักษณะ คือ แบบภายนอกท่อได้วางหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์นอกท่อ ก่อนวางหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์นั้นต้องทำ อัลตราโซนิกเจลกับท่อรอบๆ บริเวณที่จะวางหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ การวางหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ทั้งสองทำมุม 30 องศา ดังแสดงในภาพที่ 19 และแบบภายในท่อ การวางหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ภายในท่อนั้นจะต้องเจาะรูสองรูให้ทั้งสองรูให้ได้รูปทรงที่พอเหมาะ กับขนาดของหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์โดยคำนึงถึง ทั้งสองรูทำมุม 30 องศา เมื่อเจาะท่อได้ขนาดที่ต้องการแล้วนำหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ประกอบเข้ากับท่อ ดังแสดงในภาพที่ 20



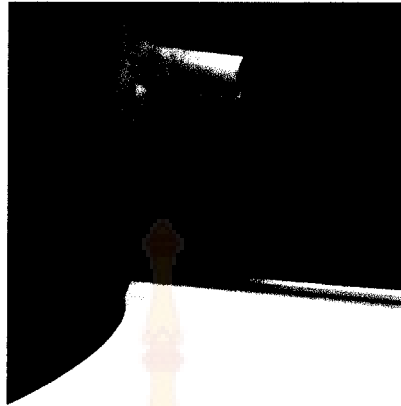
ภาพที่ 19 วิธีการส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกภายนอกท่อ



ภาพที่ 20 วิธีการส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกภายในท่อ

### 3.2.1.2 สร้างชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

(1) สร้างชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ตามที่ออกแบบนำมาทดสอบพัฒนาจนได้ค่าที่สอบวัดที่เหมาะสม โดยใช้ท่อแบบที่ 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0139 เมตร หนา 0.00206 เมตร ยาว 5 เมตร ปลายท่อมีฝาเปิด-ปิดน้ำ ถึงสูง 0.3 เมตร แนวการเจาะถึงวัดจากกันถึงขึ้นมาเป็นระยะ 0.225 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของท่อ เจาะถึงเชื่อมเข้ากับท่อดังภาพที่ 21 โดยท่อน้ำวางตามแนวราบยึดติดกับแคลมป์ รััดท่อด้วยสายรัดจัดท่อให้อยู่ในแนวระดับเดียวกันตลอดทั้งเส้นดังภาพที่ 22 โดยใช้ไม้วัดระดับน้ำ นำถังมารองน้ำด้านปลายท่อ ติดตั้งหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ 2 หัวให้อยู่ระหว่างกลางท่อดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 21 ถังพลาสติกต่อกับข้อต่อตรงด้วยวิธีการเชื่อมพลาสติก



ภาพที่ 22 ท่อน้ำวางตามแนวราบยึดติดกับแคลมป์

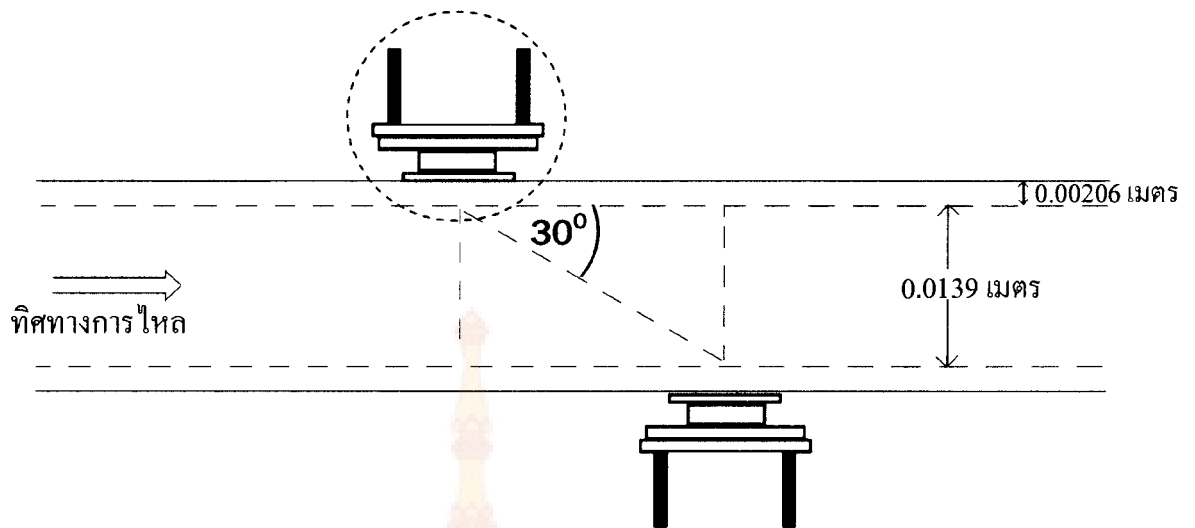


ภาพที่ 23 หัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ 2 หัวติดตั้งอยู่ระหว่างกลางท่อ

(2) การสอบวัดเครื่องมือทำโดยหาความหนืดของน้ำ ในชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเปรียบเทียบกับความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K แล้วทำการปรับปรุงชุดทดลอง โดยมีขั้นตอนการสอบวัดดังนี้

ต่อ Function generator เข้ากับหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์เพื่อหา  $t_{up}$  หรือ  $t_{down}$  โดยปรับ Function generator ให้มีความถี่ 40 kHz เป็นคลื่นรูป sine wave กดปุ่ม on บน Function generator เพื่อปล่อยคลื่นสัญญาณ

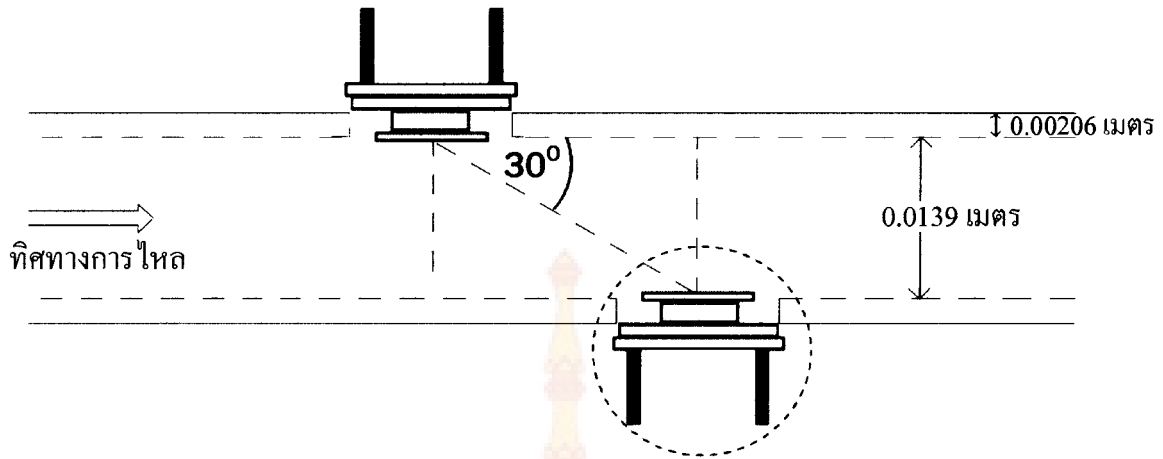
หัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์อีกหัวจะเป็นหัวรับสัญญาณ ต่อเข้ากับ AC-amplifier ทางด้าน input เพื่อขยายสัญญาณที่ได้รับมาส่วนทางด้าน output ต่อเข้ากับออสซิลโลสโคปอ่านค่าผลต่างของเวลาจากออสซิลโลสโคป



ภาพที่ 24 การหาค่า  $t_{down}$  เมื่อส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกไปตามกระแสการไหลของน้ำ

ในการหาค่า  $t_{down}$  มีขั้นตอนดังนี้

- (1) หาค่า  $t_{down}$  ดังแสดงในภาพที่ 24 พิจารณาจากหัวอัลตราโซนิกที่วงเส้นประ ด้านบน ต่อสายสัญญาณส่งคลื่นอัลตราโซนิกเข้ากับ Function generator หัวอัลตราโซนิกที่อยู่ด้านล่างจะเป็นหัวรับสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกต่อเข้ากับ ออสซิลโลสโคป เพื่อตรวจสอบสัญญาณ
- (2) ทำเครื่องหมายระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณความสูงของน้ำในถัง
- (3) ปิดฝาที่ปลายปากท่อ
- (4) ต้มน้ำให้ได้อุณหภูมิ 313.15 K แล้วเติมลงในถัง
- (5) เปิดฝาที่ปลายปากท่อให้น้ำไหลสังเกตระดับน้ำที่ทำเครื่องหมายไว้
- (6) เมื่อน้ำลดลงถึงระดับที่กำหนดอ่านค่าผลต่างของเวลา จากออสซิลโลสโคป บันทึกค่า  $t_{down}$



ภาพที่ 25 การหาค่า  $t_{up}$  เมื่อส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกทวนกระแสการไหลของน้ำ

ในการหาค่า  $t_{up}$  มีขั้นตอนดังนี้

- (1) หาค่า  $t_{up}$  ดังแสดงในภาพที่ 25 พิจารณาจากหัวอัลตราโซนิกที่วางเส้นประด้านล่าง ต่อสายสัญญาณส่งคลื่นอัลตราโซนิกเข้ากับ Function generator หัวอัลตราโซนิกที่อยู่ด้านบนจะเป็นหัวรับสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกต่อเข้ากับออสซิลโลสโคป เพื่อตรวจสอบสัญญาณ
- (2) ทำเครื่องหมายระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณความสูงของน้ำในถัง
- (3) ปิดฝาที่ปลายปากท่อ
- (4) ต้มน้ำให้ได้อุณหภูมิ 313.15 K แล้วเค็มลงในถัง
- (5) เปิดฝาที่ปลายปากท่อให้น้ำไหลส่งเกดระดับน้ำที่ทำเครื่องหมายไว้
- (6) เมื่อน้ำลดลงถึงระดับที่กำหนดอ่านค่าผลต่างของเวลา จากออสซิลโลสโคป บันทึกค่า  $t_{up}$

### 3.2.2 หาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ดังนี้

3.3.1 การหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K ดังแสดงในภาคผนวก ข

3.3.2 หาคความแม่นยำ (precision) ของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกโดยหาความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K จำนวน 50 ครั้ง วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

### 3.3 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการสร้างชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ในการออกแบบชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ชุดทดลองประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ถังน้ำ ส่วนที่ 2 ท่อน้ำที่มีหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ ส่วนที่ 3 ถังรองน้ำและส่วนป้อนกลับของของไหล และส่วนที่ 4 ชุดควบคุมและจอแสดงผล

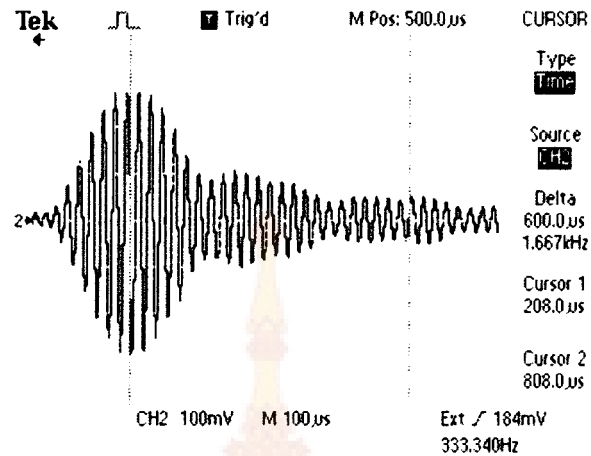
โดยในส่วนของท่อน้ำผู้วิจัยทำการออกแบบโดยกำหนดขนาดและแบบท่อ โดยทดลองท่อ 2 แบบ พบว่า ท่อแบบที่ 1 มีอัตราการไหลของน้ำมีค่ามากทำให้การควบคุมอัตราการไหลของน้ำเป็นไปได้ยาก ส่วนการตรวจสอบวัดความดันนั้น พบว่าความดันมีค่าน้อยและมีค่าขึ้นลงไม่คงที่ ซึ่งมีผลให้การอ่านค่าความดันผิดพลาด และเมื่อปรับให้ท่อแบบมิลลิเมตร ทำมุมเอียงกับแนวตั้งเพื่อต้องการแก้ปัญหาความดันมีค่าน้อย พบว่าความดันของน้ำมีค่าขึ้นๆ ลงๆ ไม่คงที่ทำให้มีความผิดพลาด และในส่วนของเครื่องสร้างสัญญาณอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ เมื่อใช้ออสซิลโลสโคปตรวจสอบคลื่นสัญญาณ พบว่าในการสร้างสัญญาณจะเป็นแบบต่อเนื่อง ทำให้การอ่านค่าสัญญาณเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตามท่อแบบที่ 1 ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลของน้ำได้ ทำให้ไม่สามารถใช้สมการที่ (20) (Cengel และคณะ, 2006) มาคำนวณอัตราการไหลของน้ำเพื่อจะหาความหนืดของน้ำได้

ส่วนท่อแบบที่ 2 พบว่าสามารถควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้เป็นแบบ Laminar flow ได้ คือ ลักษณะการไหลจะเป็นอย่างราบเรียบมีค่า Reynolds Number จาก 0 ถึง 2,000 (สมศักดิ์, 2540) ส่งผลให้ควบคุมความดันของน้ำได้ ตามสมการที่ (24) ส่วนการส่งสัญญาณผ่านท่อ จากภายนอกท่อน้ำ ภาครับสัญญาณยังไม่สามารถรับสัญญาณที่ภาคส่งสัญญาณส่งมาให้ได้

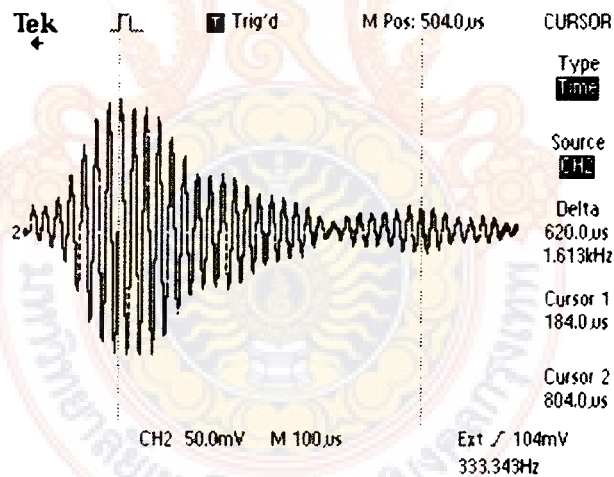
จากแบบท่อทั้ง 2 แบบ ผู้วิจัยเลือกท่อแบบที่ 2 เนื่องจากสามารถควบคุมอัตราการไหลให้เป็นแบบ laminar flow และสามารถควบคุมความดันได้

โดยการส่งสัญญาณอัลตราโซนิกภายนอกท่อ พบว่า สัญญาณอัลตราโซนิกภาครับสัญญาณไม่สามารถรับสัญญาณได้

ส่วนการส่งสัญญาณอัลตราโซนิกภายในท่อ พบว่าสามารถส่งและรับสัญญาณได้ทั้งในน้ำนิ่งและน้ำไหล โดยพบว่าผลต่างของเวลาทวนกระแสการไหลของน้ำจะมีค่ามากกว่าตามกระแส น้ำ ดังแสดงในภาพที่ 26 และ 27



ภาพที่ 26 ภาพการรับสัญญาณเมื่อหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ส่งคลื่นอัลตราโซนิก  
ไปตามกระแสการไหลของน้ำ



ภาพที่ 27 ภาพการรับสัญญาณเมื่อหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ส่งคลื่นอัลตราโซนิก  
ไปทวนกระแสการไหลของน้ำ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธีการส่งสัญญาณอัลตราโซนิกภายในท่อ เนื่องจากสามารถวัดสัญญาณอัลตราโซนิกได้ทั้งภาครับและภาคส่ง แล้วนำมาสอบวัดเครื่องมือโดยหาความหนืดน้ำ เปรียบเทียบกับความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K โดยชุดทดลองดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยความหนืดน้ำอยู่ที่  $0.000590 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  ซึ่งใกล้เคียง กับค่าความหนืดน้ำมาตรฐานที่  $0.000656 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  (Cengel และคณะ, 2006)

#### 4.2 ผลการหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่น อัลตราโซนิก

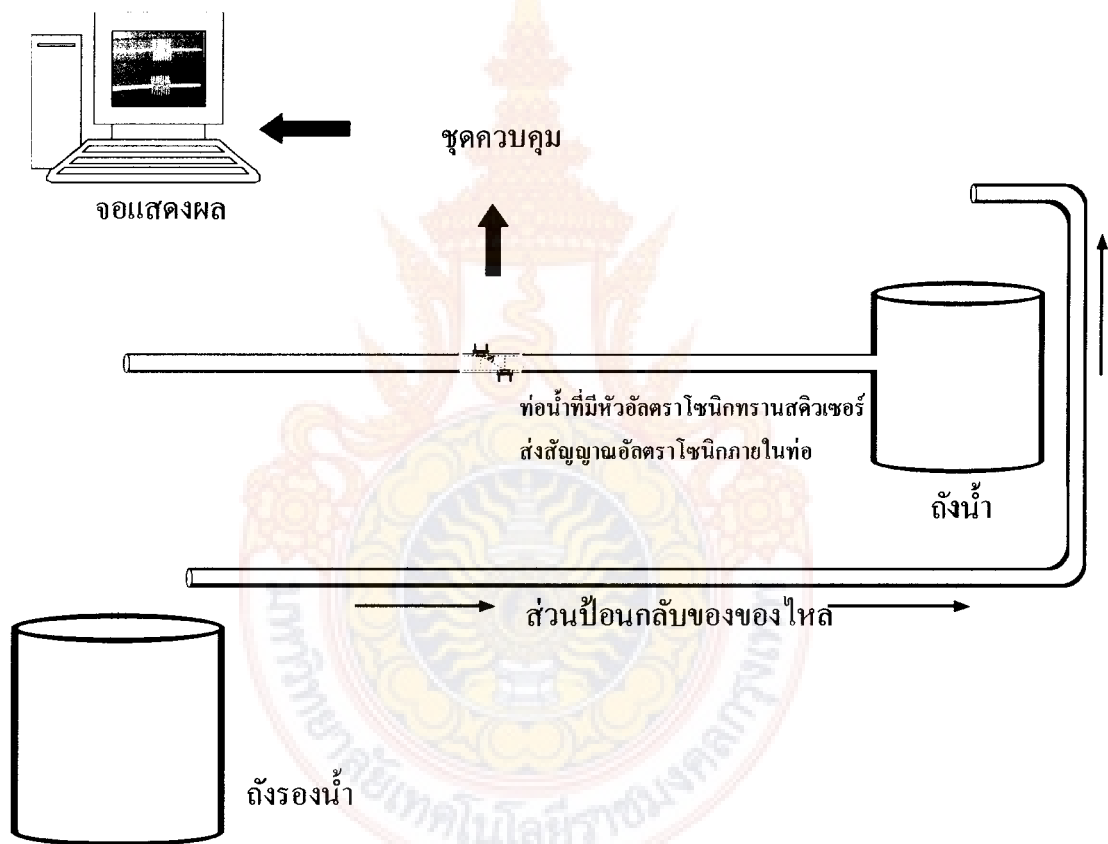
ชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากการวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ถังน้ำ

ส่วนที่ 2 ท่อน้ำที่มีหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกภายในท่อ

ส่วนที่ 3 ถังรองน้ำและส่วนป้อนกลับของของไหล

ส่วนที่ 4 ชุดควบคุมและจอแสดงผล



ภาพที่ 28 ส่วนประกอบสำคัญของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

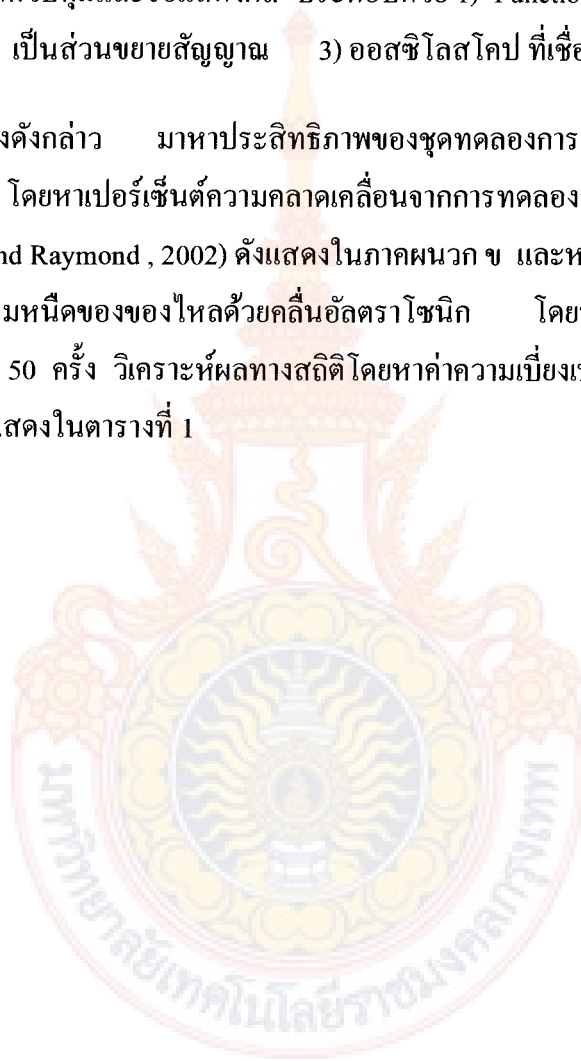
ส่วนที่ 1 ถังน้ำ เป็นถังพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 เมตร สูง 0.30 เมตร แนวการเจาะถึงวัดจากก้นถังขึ้นมาเป็นระยะ 0.225 เมตร เป็นจุดกึ่งกลางของท่อ แล้วเจาะเพื่อเชื่อมต่อกับท่อน้ำ

ส่วนที่ 2 ท่อน้ำที่มีหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกภายในท่อ โดยท่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0139 เมตร ยาว 5 เมตร ตรงกลางท่อเจาะท่อ 2 ช่องให้พอดีกับหัว อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ โดยวางให้ทำมุมกัน 30 องศา

ส่วนที่ 3 ถังร่อนน้ำและส่วนป้อนกลับของของไหล

ส่วนที่ 4 ชุดควบคุมและจอแสดงผล ประกอบด้วย 1) Function generator เป็นแหล่งกำเนิด ความถี่ 2) Ampifier เป็นส่วนขยายสัญญาณ 3) ออสซิลอโคป ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

นำชุดทดลองดังกล่าว มาหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วย คลื่นอัลตราโซนิก โดยหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K (Chapra and Raymond , 2002) ดังแสดงในภาคผนวก ข และหาความแม่นยำ (precision) ของ ชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยหาความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K จำนวน 50 ครั้ง วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Kinney, 2002) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ผลการวัดความหนืด  $\eta$  ของน้ำที่อุณหภูมิ 313.5 k ด้วยชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่น อัลตราโซนิค จำนวน 50 ครั้ง

ครั้งที่	$t_{up}$ (s)	$t_{down}$ (s)	อัตราการไหล $Q(m^3 / s)$	ความหนืด $\eta(N.s / m^2)$	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
1	0.000608	0.0006	0.00003083	0.000583005	11.12722479
2	0.000592	0.000584	0.00003253	0.000552525	15.77355584
3	0.000612	0.000604	0.00003043	0.000590753	9.946152378
4	0.000596	0.000588	0.00003210	0.000560069	14.62366686
5	0.000612	0.000604	0.00003043	0.000590753	9.946152378
6	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
7	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
8	0.000608	0.0006	0.00003083	0.000583005	11.12722479
9	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
10	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
11	0.0006	0.000592	0.00003167	0.000567663	13.46598203
12	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
13	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
14	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
15	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
16	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
17	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113

ตารางที่ 1 (ต่อ)

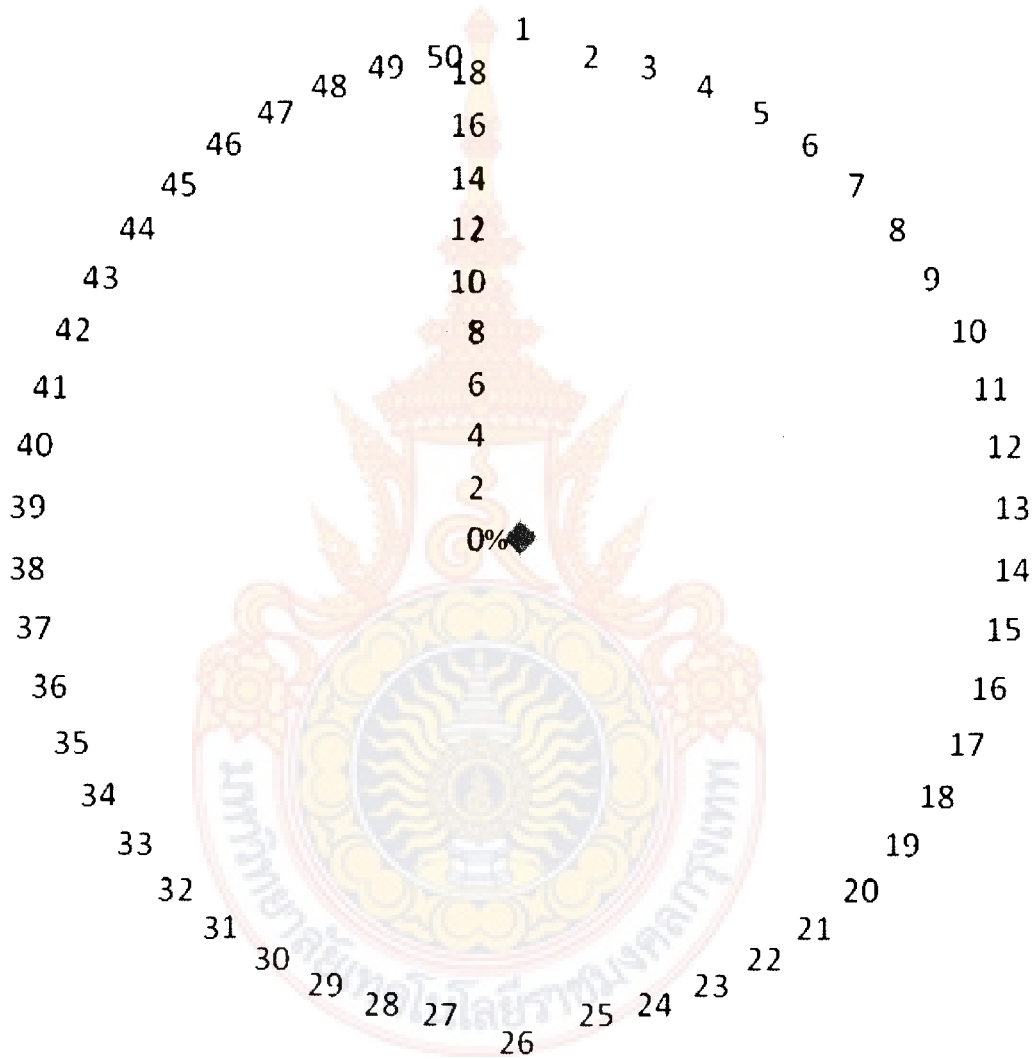
ครั้งที่ ที่	$t_{up}$ (s)	$t_{down}$ (s)	อัตราการไหล $Q(m^3 / s)$	ความหนืด $\eta(N.s / m^2)$	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
18	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
19	0.000624	0.000616	0.00002926	0.000614304	6.356160011
20	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
21	0.000612	0.000604	0.00003043	0.000590753	9.946152378
22	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
23	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
24	0.000588	0.00058	0.00003298	0.000545033	16.91564896
25	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
26	0.0006	0.000592	0.00003167	0.000567663	13.46598203
27	0.000604	0.000596	0.00003125	0.000575309	12.30050134
28	0.000604	0.000596	0.00003125	0.000575309	12.30050134
29	0.000592	0.000584	0.00003253	0.000552525	15.77355584
30	0.000612	0.000604	0.00003043	0.000590753	9.946152378
31	0.000608	0.0006	0.00003083	0.000583005	11.12722479
32	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
33	0.0006	0.000592	0.00003167	0.000567663	13.46598203
34	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
35	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
36	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
37	0.0006	0.000592	0.00003167	0.000567663	13.46598203
38	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
39	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
40	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
41	0.000608	0.0006	0.00003083	0.000583005	11.12722479
42	0.000612	0.000604	0.00003043	0.000590753	9.946152378

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ครั้งที่	$t_{up}$ (s)	$t_{down}$ (s)	อัตราการไหล $Q(m^3 / s)$	ความหนืด $\eta(N.s / m^2)$	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
43	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
44	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
45	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
46	0.00062	0.000612	0.00002964	0.000606402	7.560619991
47	0.0006	0.000592	0.00003167	0.000567663	13.46598203
48	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
49	0.000616	0.000608	0.00003003	0.000598552	8.757284113
50	0.0006	0.000592	0.00003167	0.000567663	13.46598203
ค่าเฉลี่ย				0.000590253	10.02239586
ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.00001699	

จากผลการทดสอบชุดทดลองพบว่ามีความแม่นยำ (precision) ของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกโดยหาความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K จำนวน 50 ครั้ง มีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 0.000545033 – 0.000614304 N.s/m<sup>2</sup> ค่าเฉลี่ยความหนืดน้ำอยู่ที่ 0.000590253 N.s/m<sup>2</sup> ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความหนืดน้ำมาตรฐานที่ 0.000656 N.s/m<sup>2</sup> (Cengel และคณะ, 2006) และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00001699

จากผลการทดสอบชุดทดลองพบว่าประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K (Chapra and Raymond , 2002) อยู่ในช่วงร้อยละ 6.3561-16.915 คิดเป็นค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10.0223 (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\pm 2.59$ ) ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 29 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K จำนวน 50 ครั้ง ของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบชุดทดลองโดยนำชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก วัดค่าความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ 283.15 K 288.15 K 293.15 K 303.15 K และ 313.15 K วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่แต่ละอุณหภูมิ (Chapra and Raymond , 2002) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 30

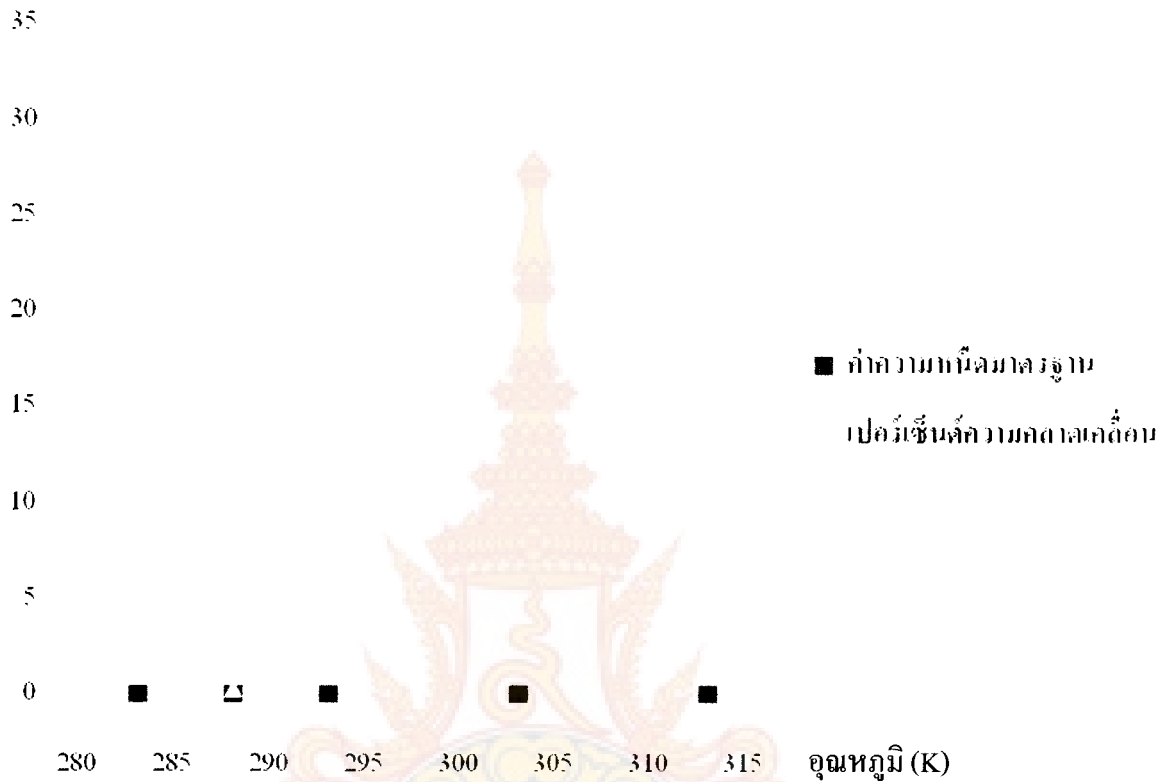
ตารางที่ 2 ผลการวัดความหนืด  $\eta$  ของน้ำที่อุณหภูมิ คือ 283.15 K 288.15 K 293.15 K 303.15 K และ 313.15 K ด้วยชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

อุณหภูมิ (K)	$t_{up}$ (s)	$t_{down}$ (s)	อัตราการไหล $Q(m^3 / s)$	ความหนืด $\eta(N.s / m^2)$	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
283.15	0.00062	0.000616	0.00001473	0.001220731	6.671904159
	0.000624	0.00062	0.00001454	0.001236585	5.459850966
	0.00062	0.000616	0.00001473	0.001220731	6.671904159
			ค่าเฉลี่ย	0.001226016	6.267886428
			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00000915	
			ค่าความหนืดมาตรฐาน	0.001308	
288.15	0.000616	0.000612	0.00001492	0.00120498	5.700010481
	0.000596	0.000592	0.00001594	0.001127757	1.073905817
	0.000588	0.000584	0.00001638	0.001097584	3.720667815
			ค่าเฉลี่ย	0.001143441	0.301812283
			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00005539	
			ค่าความหนืดมาตรฐาน	0.001140	
293.15	0.000568	0.000564	0.00001756	0.001023942	1.884736205
	0.000576	0.000572	0.00001707	0.001053092	4.78526061
	0.00058	0.000576	0.00001683	0.00106782	6.250788731
			ค่าเฉลี่ย	0.001048285	4.306928515
			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00003273	
			ค่าความหนืดมาตรฐาน	0.001005	

ตารางที่ 2 (ต่อ)

อุณหภูมิ (K)	$t_{up}$ (s)	$t_{down}$ (s)	อัตราการไหล $Q(m^3 / s)$	ความหนืด $\eta(N.s / m^2)$	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
303.15	0.000564	0.00056	0.00001781	0.00100952	26.03244522
	0.000584	0.00058	0.00001660	0.001082651	35.16245518
	0.000584	0.00058	0.00001660	0.001082651	35.16245518
			ค่าเฉลี่ย	0.001058274	32.11911853
			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00004222	
			ค่าความหนืดมาตรฐาน	0.000801	
313.15	0.000604	0.000596	0.00003125	0.000575309	12.30050134
	0.000612	0.000604	0.00003043	0.000590753	9.946152378
	0.000624	0.000616	0.00002926	0.000614304	6.356160011
			ค่าเฉลี่ย	0.000593455	9.534271242
			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00056962	
			ค่าความหนืดมาตรฐาน	0.000656	

## เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 30 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหล ด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในช่วงอุณหภูมิ 283.15 K 288.15 K 293.15 K 303.15 K และ 313.15 K กับค่าความหนืดมาตรฐาน

จากภาพจะเห็นว่าค่าความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 283.15 K 288.15 K 293.15 K และ 313.15 K เป็นช่วงที่ชุดทดลองทำงานได้ดี เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 0 - 10 โดยที่อุณหภูมิ 288.15 K มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยมากที่สุดคือ 0.301812283 ส่วนที่อุณหภูมิที่ 303.15 K มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าช่วงอุณหภูมิต่อๆ ที่ร้อยละ 32.11911853 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากชุดทดลองดังกล่าวมีความเหมาะสมในการวัดความหนืดน้ำในช่วงอุณหภูมิต่างช่วง อย่างไรก็ตามก็ควรมีการศึกษาหาสาเหตุที่ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่อไป

## บทที่ 5

### สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป อภิปรายผล

การศึกษาเรื่องการสร้างและหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก และเพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากการวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ถังน้ำ เป็นถังพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 เมตร สูง 0.30 เมตร แนวการเจาะถังวัดจากกันถึงขึ้นมาเป็นระยะ 0.225 เมตร เป็นจุดกึ่งกลางของท่อ แล้วเจาะเพื่อเชื่อมต่อกับท่อน้ำ

ส่วนที่ 2 ท่อน้ำที่มีหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกภายในท่อ โดยท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0139 เมตร ยาว 5 เมตร ตรงกลางท่อเจาะท่อ 2 ช่องให้พอดีกับหัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ โดยวางให้ทำมุมกัน 30 องศา

ส่วนที่ 3 ถังรองน้ำและส่วนป้อนกลับของของไหล

ส่วนที่ 4 ชุดควบคุมและจอแสดงผล

5.1.2 ในการหาประสิทธิภาพของชุดทดลองการวัดความหนืดของของไหลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก พบว่าชุดทดลองเมื่อนำมาหาความหนืดของน้ำ ที่อุณหภูมิ 313.15 K จำนวน 50 ครั้ง ได้ค่าความหนืดอยู่ในช่วง  $0.000545\text{-}0.000614\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  ค่าเฉลี่ยความหนืดน้ำอยู่ที่  $0.000590\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความหนืดน้ำมาตรฐานที่  $0.000656\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  (Cengel และคณะ, 2006) มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $0.000016$  และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K อยู่ในช่วงร้อยละ 6.35-16.91 คิดเป็นค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10.02 (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\pm 2.59$ )

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชุดทดลอง โดยใช้หัวทรานสดิวเซอร์ ที่มีการใช้งานของความถี่แตกต่างกัน

## บรรณานุกรม

- กองควบคุมเครื่องสำอาง. มปป. “หลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิตเครื่องสำอาง (Good Manufacturing Practice:GMP)” [ออนไลน์] เข้าถึงข้อมูลได้จาก:  
<http://www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/cosmetic/cosmetic/dat/gmp-std.html>.  
 (วันที่สืบค้น 20 กันยายน 2552)
- ทวิช จิตรสมบูรณ์. 2549. กลศาสตร์ของไหล **Fluid Mechanics**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.  
 ปัจจะ ทรัพย์ประเสริฐ. 2538. “เทคโนโลยีการวัดอัตราการไหลด้วยอัลตราโซนิก” เทคนิค  
 เครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม. 125, (กรกฎาคม 2538): 157-162
- สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2543. การทดสอบแบบไม่ทำลาย **NON DESTRUCTIVE TESTING**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- สุชาติ แซ่เฮง. 2544. คลื่นเสียงและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: องค์การคำครุสภา.
- สุนันท์ ศรีณนิตย์. 2548. กลศาสตร์ของไหล **FLUID MECHANICS**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ:  
 สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- สมศักดิ์ ไชยะภินันท์. 2552. กลศาสตร์ของไหล. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมศักดิ์ กิริตวิเศษฐ์. 2540. หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 12.  
 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- Cengel, A. Yunus and John, M. Cimbala. 2006. **Fluid Mechanics Fundamentals and Application**. New York: McGraw-Hill.
- Chapra, S. C. and Raymond, P. Canale. 2002. **Numerical Methods for Engineers with Software and Programming Applications**. New York: McGraw-Hill.
- Cutnell, John D. and Johnson, Kenneth W. 2010 : **Introduction to Physics**. 8<sup>th</sup> ed. Asia: John Wiley & Sons (Asia) pte Ltd.
- Kandpal, J.B. and M. Madan. 1994. **Jatropha curcas: a renewable source of energy for meeting future energy needs**. Technical Note. 6: 159-160.
- Kinney, John J. 2002. **Statistics for Science and Engineering**. New York: Addison Wesley Publishing Company.

- Raj, Baldev, V. Rajendran and P. Palanichamy. 2007. **Science and Technology of Ultrasonics**.  
India: Alpha Science Internationnal Ltd.
- Wang, L., Kathryn, I., McCarthy, Michael J. McCarthy. 2004. **Effect of temperature gradient  
on ultrasonic Doppler velocimetry measurement during pipe flow**. Food Research  
International. 37(2004): 633-642.
- Young, H.D. and Roger A.Freedman. 2000. **University Physics with Modern Physics**. 10 th  
ed. New York : Addison-Wesley Publishing Company.

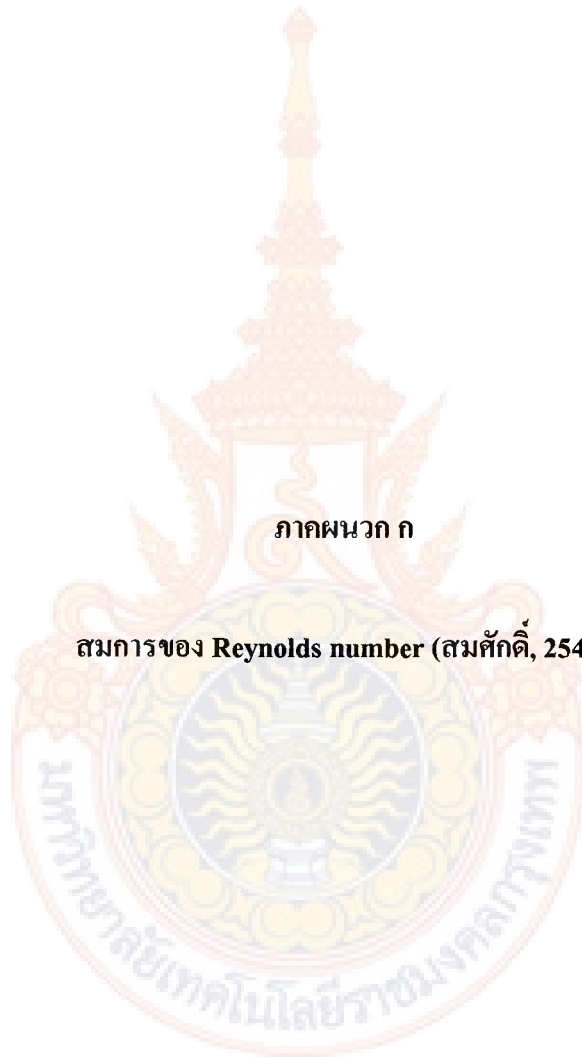




ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สมการของ Reynolds number (สมศักดิ์, 2540)



สมการของ Reynolds number (สมศักดิ์, 2540)

จากสมการที่ (20)  $Re = \frac{\rho v D}{\eta}$   
 จะได้  $v = \frac{\eta Re}{\rho D}$  (31)

และจากสมการของความเร็วในการไหลของของเหลวที่มีความหนืด  $\eta$  ไหลผ่านท่อซึ่งมีรัศมีภายในเท่ากับ  $R$  ยาว  $L$  ที่ระยะห่าง  $r$  จากจุดกึ่งกลางท่อ

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4\eta L} (R^2 - r^2)$$

จึงได้  $\frac{\eta Re}{\rho D} = \frac{P_1 - P_2}{4\eta L} (R^2 - r^2)$

และ  $P_1 - P_2 = \frac{4\eta^2 L Re}{(R^2 - r^2)\rho D}$  (32)

ในการทดลอง  $P_1 - P_2 = \rho gh$  เมื่อ  $h$  แทนความสูงของระดับน้ำในถังจากจุดกึ่งกลางท่อ

จึงได้  $\rho gh = \frac{4\eta^2 L Re}{(R^2 - r^2)\rho D}$

และ  $h = \frac{4\eta^2 L Re}{(R^2 - r^2)\rho^2 g D}$

เนื่องจาก  $D = 2R$  และ  $r = 0$  เมื่อพิจารณาการไหลในแนวกึ่งกลางท่อ

ดังนั้น  $h = \frac{4\eta^2 L Re}{2R^3 \rho^2 g}$  (33)

การไหลจะเป็นการไหลแบบราบเรียบเมื่อ  $Re < 2,000$

ภาคผนวก ข

การหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K



การหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวัดความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 313.15 K

(Chapra and Raymond , 2002)

$$\%Error = \left| \frac{true - experiment}{true} \right| \times 100\%$$





ภาคผนวก ค

ประวัติผู้รับผิดชอบแผนงานวิจัย

### ประวัติผู้รับผิดชอบแผนงานวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายบุญคุ้ม กงมหา  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Boonkum Kongmaha
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ พนักงานมหาวิทยาลัย
4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)  
ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
สาขาวิชาฟิสิกส์  
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ เขตสาทร แขวงทุ่งมหาเมฆ กรุงเทพฯ 10120
5. หมายเลขโทรศัพท์ 02-287-9731
6. โทรสาร -
7. e-mail bkongmaha@hotmail.com
5. ประวัติการศึกษา  
พ.ศ. 2543 วท.บ. (วิทยาศาสตร์บัณฑิต)  
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง  
พ.ศ. 2548 วท.ม. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต)  
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ -
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย -
  - 7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย -
  - 7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย -
  - 7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง) -
  - 7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพในการทำการวิจัยว่าได้ทำการวิจัยลุล่วงแล้วประมาณร้อยละเท่าใด