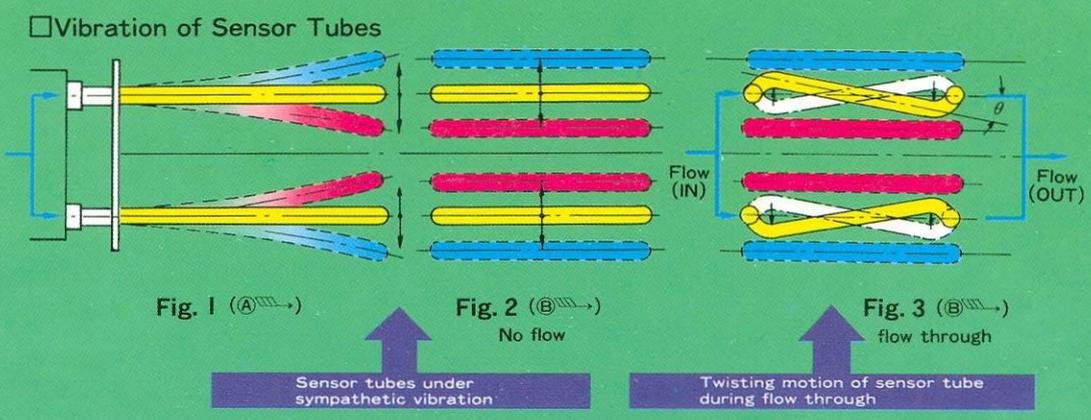
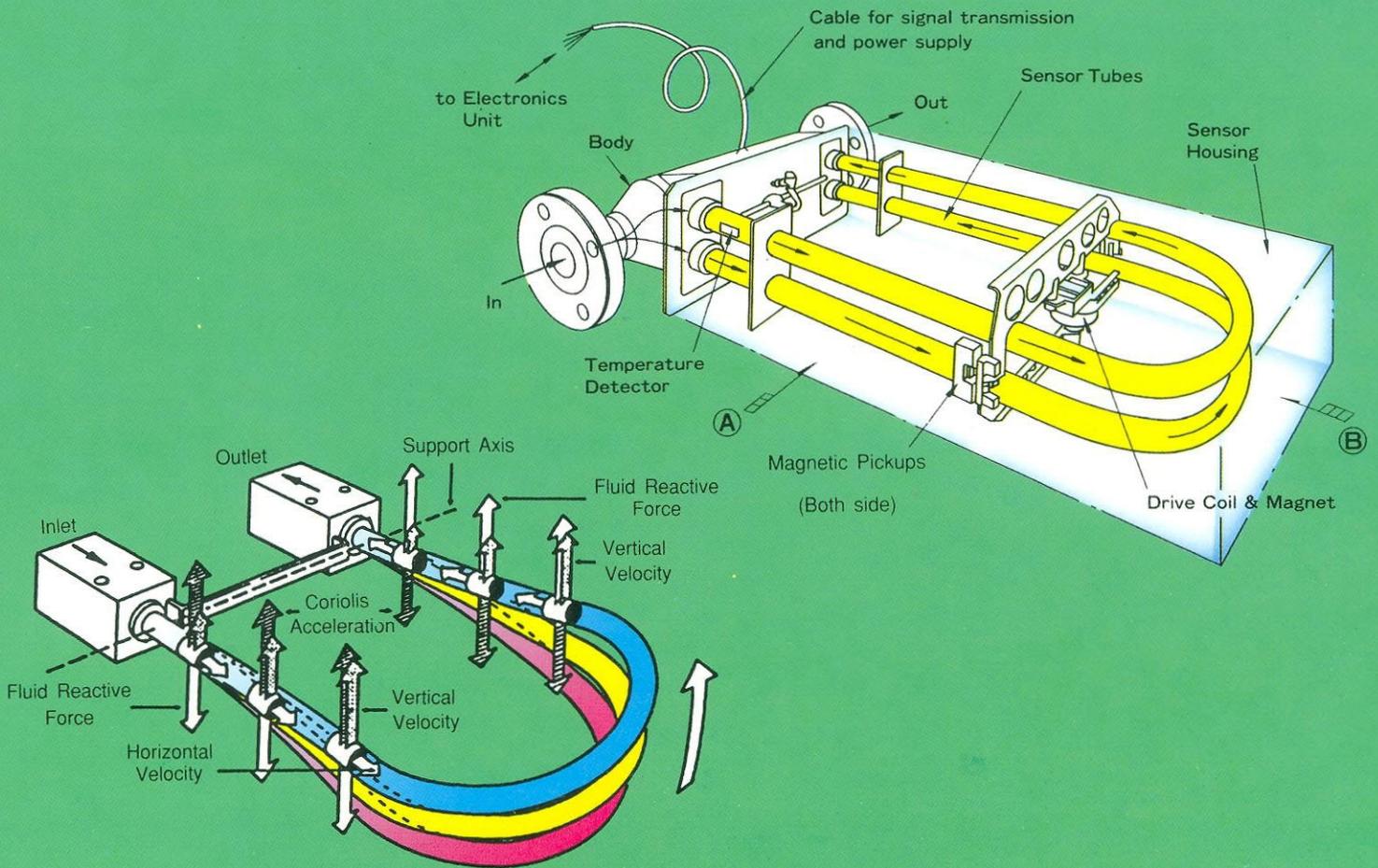


# นาฬิกามาตรวัดมวลคอริออลิส

## Coriolis Mass Flowmeters



สำนักงานกลางมาตรชี้ตวงวัด  
 (Central Bureau of Weights & Measures)  
 กรมทะเบียนการค้า



มาตรฐานการวัดมวลคอริออลิส  
(coriolis mass flowmeters)

---

เรียบเรียง

นายโสภณ โสภาสภิตติ  
นายสาธิต ชูสุวรรณ

---

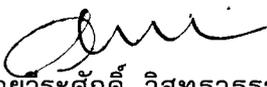
สำนักงานกลางมาตรารัฐ  
(CENTRAL BUREAU OF WEIGHTS & MEASURES)



## คำนำ

ในแต่ละปีประเทศไทยได้ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงไปเป็นจำนวนมากสำหรับการขนส่ง โรงงานอุตสาหกรรม การผลิตไฟฟ้า และอื่นๆ อีกมากมาย มาตรการน้ำมันเป็นเครื่องชั่งตวง วัดชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับการซื้อขายน้ำมันเชื้อเพลิง เดิมมาตรการน้ำมันถูกออกแบบมาให้วัด ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงได้ในหน่วยปริมาตรซึ่งการวัดปริมาณเป็นหน่วยปริมาตรนี้ปริมาณ น้ำมันที่วัดได้จะแปรผันตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมซึ่งทำให้เกิดการได้เปรียบ หรือเสียเปรียบกันขึ้น ดังนั้นจึงมีผู้ค้นคิดมาตรการวัดน้ำมันที่สามารถวัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงได้ ในหน่วยน้ำหนักโดยไม่ต้องใช้โปรแกรม (software) เข้าช่วยซึ่งเรียกว่า “มาตรการมวลคอริออ- ริส” อีกทั้งค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงรักษาต่ำ ดังนั้นมาตรการมวลคอริออริสจึงเป็นที่นิยมใช้กัน เพิ่มขึ้นในวงการประกอบธุรกิจด้านน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งขณะนี้ได้นำมาใช้ในประเทศเพื่อใช้วัด ซื้อขายปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงกันเพิ่มมากขึ้น จุดประสงค์ของหนังสือเล่มนี้เพื่อให้เจ้าหน้าที่ ชั่งตวงวัดได้รู้จักการทำงาน ประสิทธิภาพ ข้อจำกัดการทำงานและอิทธิพลที่มีผลต่อการทำงาน รวมไปถึงการใช้งานและวิธีการสอบเทียบความเที่ยงตรงด้วยวิธีการต่างๆ ของมาตรการมวล คอริออริส

หวังว่าหนังสือ “มารู้จักมาตรการวัดมวลคอริออริส” เล่มนี้ คงเป็นประโยชน์ต่อเจ้า หน้าที่ชั่งตวงวัดทุกท่านรวมทั้งผู้สนใจ เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานช่วยให้การปฏิบัติงานของท่าน เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

  
(นายวีระศักดิ์ วิสุทธาธรรม)  
ผู้อำนวยการกองชั่งตวงวัด



# สารบัญ

	หน้า
<b>บทที่ 1</b>	
<b>โครงสร้างมาตรวัดมวลคอริออริส (Coriolis Mass Flowmeter Construction)</b>	1
<b>ชนิดของมาตรวัดมวล</b>	
1. มาตรวัดมวลใช้หลักการ "Inferential"	1
2. มาตรวัดมวลใช้หลักการ "Thermal"	2
2.1. Thermo - anemometers หรือ Rate of Heat Loss Flowmeter	2
2.2. Calorimetric Meter หรือ Temperature Rise Flowmeter	5
3. มาตรวัดมวลใช้หลักการ "True mass flow"	7
<b>โครงสร้างของมาตรวัดมวลคอริออริส</b>	9
1. หน่วยวัด ("sensor unit" หรือ "tube sensor" หรือ "vibrating measuring section")	9
1.1 ท่อวัด (Measuring tubes)	10
1.2 ตัวแบ่งการไหล (Flow splitter)	12
1.3 ตัวกำเนิดคลื่นสะเทือน (Drive coil)	13
1.4 ตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ (Motion sensors)	13
1.5 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature sensors)	15
1.6 ตัวเรือน (Casing)	17
2. หน่วยอิเล็กทรอนิกส์	17
3. อุปกรณ์เสริม	22
<b>บทที่ 2</b>	
<b>หลักการทำงาน (Principle of Operation)</b>	23

	หน้า
หลักการทํางาน (principle of operation)	23
การหาค่าความหนาแน่นของเหลวภายในท่อวัด (density measurement system)	38
<b><u>บทที่ 3</u></b>	
<b>หลักการออกแบบพื้นฐานและการเลือกมาตรวัดมวลคอริออริส</b> <i>(Basic Concepts of Designing and Selecting)</i>	45
<b>การออกแบบมาตรวัดมวลคอริออริส (coriolis mass flowmeter)</b>	45
ความปลอดภัย (Safety)	46
ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ (Hazardous Area Location)	46
วัสดุใช้ทำหน่วยวัด	46
<b>สมรรถนะและข้อจำกัดการใช้งานมาตรวัดมวลคอริออริส</b>	50
<i>(Performance and Limitations of Working)</i>	
ความแม่นยำ (accuracy) และ ความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability)	50
<b>การเลือกขนาดมาตรวัดมวลคอริออริส (coriolis mass flowmeter)</b>	56
1. อัตราการไหล (flow rate) และขนาดท่อ (line size) ของระบบวัด	56
2. ความดันและอุณหภูมิใช้งาน (Pressure and temperature ratings)	56
3. ส่วนสัมผัสของเหลว (Wetted parts)	56
4. ความดันตกคร่อม (Pressure drop)	57
4.1. ความดันตกคร่อมเมื่อทำการวัดของเหลว (Pressure drop for liquid)	57
4.2. ความดันตกคร่อมเมื่อทำการวัดก๊าซ (Pressure drop for gas)	60
5. ขีดจำกัดความเร็วการไหล (Velocity limited)	62
6. ความแม่นยำ (accuracy)	62

**บทที่ 4**

<b>การติดตั้งและการบำรุงรักษา (Installation and Maintenance)</b>	63
<b>การติดตั้งมาตรวัดมวลคอริออริส (Coriolis mass flowmeter)</b>	63
1. ทิศทางในการติดตั้ง (Orientation)	63
2. โครงสร้างรองรับการติดตั้ง (Pipe supports)	66
3. วาล์วด้านทางออกมาตรวัด (Downstream valve)	69
4. การเดินสายไฟกำลังและสายสัญญาณ (wiring)	69
5. การเดินท่อนก่อนและหลังทางเข้ามาตรวัดมวลคอริออริส (Coriolis mass flowmeter)	70
6. การวัดอัตราการไหลมวลของก๊าซ (Gas flow application)	70
7. ข้อคำนึงในกรณีที่ทำกรติดตั้งพิเศษ (special application considerations)	70
<b>ปัจจัยที่มีผลต่อมาตรวัดมวลคอริออริส (Influence Quantities on Coriolis Mass Flowmeters)</b>	72
<b>การบำรุงรักษา (Maintenance)</b>	77
การตรวจสอบตัวถ่ายทอดสัญญาณ (Transmitter)	77

**บทที่ 5**

<b>การสอบเทียบ (Calibration Methods)</b>	79
<b>การสอบเทียบแบบแห้ง (a dry calibration)</b>	79
<b>การสอบเทียบแบบเปียก (a wet calibration)</b>	79
1. มาตรวัดแบบมาตรา (Master meter system)	80
2. การชั่งน้ำหนักสอบเทียบ (weighing calibration)	80
3. การใช้ถังตวงแบบมาตรา (Volumetric standard)	82
<b>การสอบเทียบความหนาแน่น (density calibration)</b>	83

	หน้า
<b>ภาคผนวก</b>	101
ก - 1 ตารางเลือกมาตรวัด	103
ก - 2 ข้อเสนอแนะการวัดการไหล	104
ก - 3 การจัดจำแนกมาตรวัดโดยสภาพของไหล	105
ก - 4 แนวทางการเลือกมาตรวัด	106
ก - 5 ข้อเสนอแนะการติดตั้งมาตรวัด	107
ก - 6 ตัวอย่างการตรวจจับการเคลื่อนที่ของท่อวัดเมื่อมีของเหลวไหลผ่าน	108
ข การหาค่าแรงคอริโอลิส (Coriolis Force)	108
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	113

# บทที่ 1

## โครงสร้างมาตรวัดมวลคอริออริส

(Coriolis Mass Flowmeter Construction)

มาตรวัดซึ่งทำหน้าที่วัดมวลโดยตรงด้วยการใช้คุณสมบัติของมวล (mass) ซึ่งต่างกับมาตรวัดชนิดอื่นๆ ที่ทำการวัดปริมาตรหรือความเร็วของเหลว มาตรวัดมวลดังกล่าวนี้ได้ถูกพัฒนาจนถึงระดับสามารถใช้งานได้ในเชิงพาณิชย์เมื่อช่วง 10 กว่าปีมานี้เอง พบว่ามาตรวัดมวล (mass flowmeters) ถูกนำไปใช้งานได้หลากหลายอย่างกว้างขวางทั้งนี้ก็เนื่องจากการวัดของเหลวเกือบจะไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงปัจจัยหรือคุณสมบัติของของเหลวซึ่งทำการวัดอยู่ แต่ในขณะเดียวกันมาตรวัดซึ่งมีหลักการทำงานที่ต่างออกไปนั้นจะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเหลว, ความหนืด, ความดัน และ/หรือ อุณหภูมิของเหลวซึ่งถูกวัดอยู่ขณะนั้น สำหรับมาตรวัดซึ่งทำการวัดมวลโดยตรง จะทำการชั่งของเหลวเมื่อของเหลวไหลผ่านมาตรวัดทำให้ผลการวัดมีความแม่นยำสูงอีกทั้งการวัดดังกล่าวแทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของขบวนการต่างๆในระบบซึ่งมาตรวัดทำงานอยู่ซึ่งมักจะเกิดขึ้นเสมอไม่ว่าขบวนการใดๆ ด้วยความสามารถโดดเด่นของมาตรวัดมวลชนิดนี้ เราจึงสามารถใช้มาตรวัดดังกล่าวเพื่อทำการวัดในระบบของเหลวซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกันหลากหลายโดยไม่จำเป็นต้องทำการสอบเทียบ (calibration) หรือ ปรับค่าชดเชยใดแก้ไขค่าใดๆ อันเนื่องการเปลี่ยนแปลงปัจจัยหรือคุณสมบัติของของเหลวซึ่งทำการวัดอยู่

ก่อนที่จะเริ่มทำความเข้าใจเกี่ยวกับมาตรวัดมวล เรามาทำความเข้าใจพื้นฐานโดยทั่วไปเกี่ยวกับมาตรวัดมวลเสียก่อน ในการหาอัตราการไหลมวลของเหลวพอจะแบ่งหลักการทำงานของมาตรวัดมวลซึ่งได้รับการออกแบบออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

1. **มาตรวัดมวลใช้หลักการ "Inferential"** มักพบเห็นมาตรวัดประเภทนี้ในปัจจุบันซึ่งจะทำการวัดอัตราการไหลโดยปริมาตรพร้อมทั้งวัดค่าความหนาแน่นของไหลควบคู่กันไปด้วย จากนั้นนำค่าดังกล่าวคำนวณด้วยสมการ

$$W = m = \rho AV \quad (1)$$

เมื่อ

$W$  = อัตราการไหลมวล (kg./s)

$\rho$  = ความหนาแน่น (kg./m<sup>3</sup>)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดท่อ (m<sup>2</sup>)

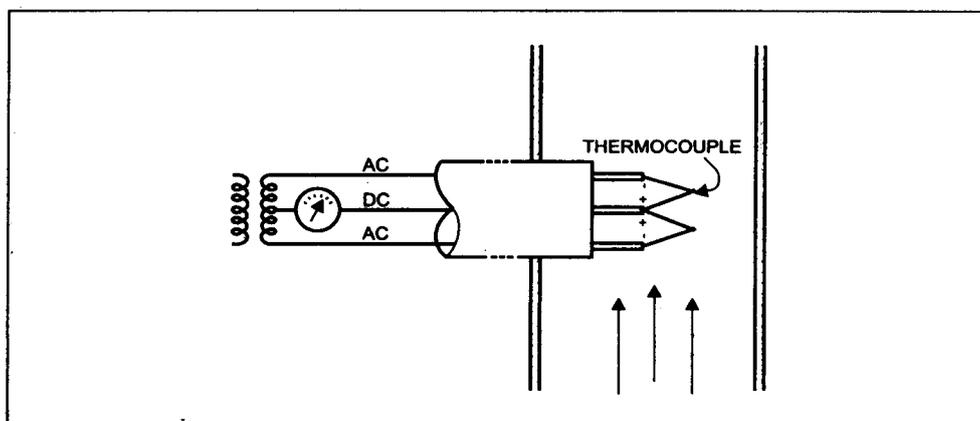
$V$  = ความเร็วเฉลี่ย (m/s<sup>2</sup>)

แต่พบว่าวิธีดังกล่าวมีข้อเสียก็คือ จำเป็นต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมได้แก่ เครื่องวัดความหนาแน่น, เครื่องวัดความดัน, เครื่องวัดอุณหภูมิ และเครื่องคำนวณ (flow computer) ซึ่งค่อนข้างมีราคาสูง อีกทั้งผลการคำนวณในบางครั้งยังมีข้อผิดพลาด (error) สูง

2. **มาตรวัดมวลใช้หลักการ "Thermal"** หลักการทำงานของมาตรวัดชนิดนี้ก็เช่นเดียวกับชื่อของมาตรวัด นั่นคือ ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อน (the heat characteristics) ของของไหลซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของการไหล ในทางปฏิบัติสำหรับเชิงพาณิชย์ มาตรวัดชนิดนี้ จะมีข้อจำกัดใช้งานกับก๊าซเท่านั้น ซึ่งแบ่งออกได้อีก 2 วิธีย่อย

### 2.1. Thermo - anemometers หรือ Rate of Heat Loss Flowmeter

มาตรวัดนี้มีหลักการทำงานคือ วัดอัตราการสูญเสียความร้อน (rate of heat loss) ไปกับการไหลของไหลผ่านแหล่งกำเนิดความร้อน (heated elements) จากรูปที่ 1 มาตรวัดชนิดนี้ประกอบด้วย



Rate of Heat Loss Flowmeter

รูปที่ 1 แสดงหลักการทำงานของมาตรวัดมวลชนิด Rate of Heat Loss Flowmeter

ลวดโลหะจุ่มอยู่ในของไหล (โดยปกติจะใช้งานกับของไหลพวกก๊าซ) ที่ต้องการวัดอัตราการไหลมวล โดยที่ขดลวดโลหะดังกล่าวจะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิคงที่ตลอดเวลาที่ของไหลไหลผ่าน พบว่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปเพื่อรักษาอุณหภูมิที่ขดลวดโลหะให้มีค่าคงที่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลมวล มาตราวัดชนิดนี้จึงมีคุณลักษณะถูกกำหนดโดย “the classic King equation” สำหรับขดลวดร้อน (a hot wire) หาได้จาก

$$Q = (T_s - T_g) \left[ k + 2(kC_v \rho_v \pi d \bar{v})^{\frac{1}{n}} \right] \quad (2)$$

เมื่อ

$Q$  = อัตราการสูญเสียความร้อนต่อหน่วยเวลา (rate of heat loss per unit time)

$T_s$  = อุณหภูมิของขดลวดซึ่งมีค่าคงที่

$T_g$  = อุณหภูมิของไหล

$k$  = ค่านำความร้อนของไหล (thermal conductivity of the fluid stream)

$d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด

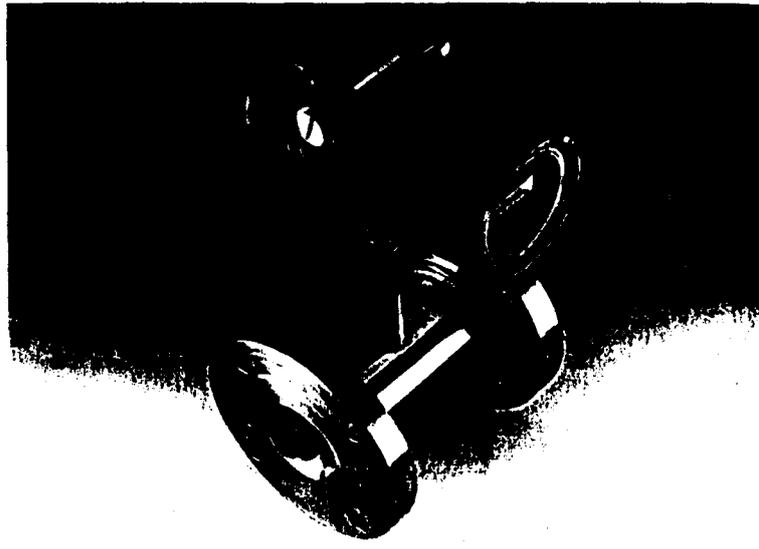
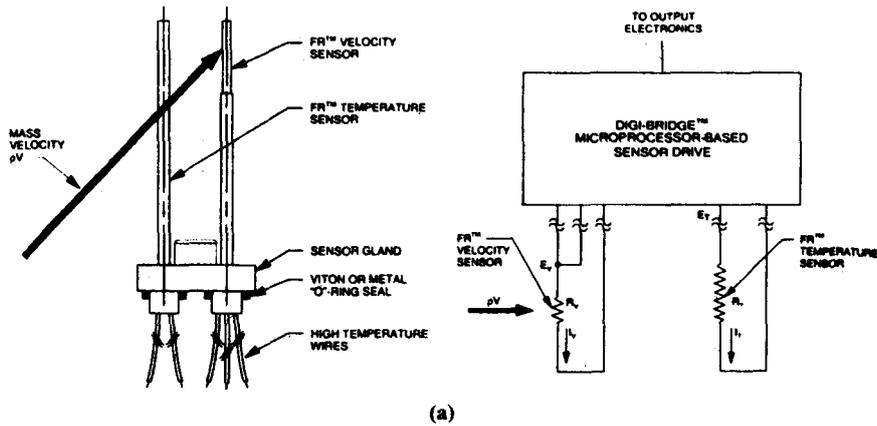
$C_v$  = ความร้อนจำเพาะของไหลที่ปริมาตรคงที่ (specific heat of the fluid stream at constant volume)

$\rho_v$  = ความหนาแน่นของไหล

$\bar{v}$  = ความเร็วเฉลี่ยการไหล (average velocity of the fluid stream)

$n$  = ค่าคงที่  $\cong 2$

หลักการทำงานของมาตรวัดชนิดนี้ได้รับความนิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลของลม เนื่องจากแหล่งกำเนิดความร้อน (heated elements) มีขนาดเล็กสามารถติดตั้งกับท่อลมได้ง่าย ใช้พลังงานเล็กน้อยสำหรับแหล่งกำเนิดความร้อน อีกทั้งมีความไวตอบสนองการวัดได้ดี ข้อเสียของมาตรวัดซึ่งมีหลักการทำงานชนิดนี้คือ การตอบสนองการวัดไม่เป็นเชิงเส้น นั้นหมายถึงการสูญเสียพลังงานความร้อนไม่ได้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการไหลของไหล นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลของไหลอีกด้วยเนื่องจากตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนเป็นเฉพาะจุด



(a) Operating principle. (b) Flowmeter.

รูปที่ 1.1

มาตรวัดมวลชนิดนี้เรียกว่า "Immersible thermal mass flowmeter" มีตัวตรวจจับสนอง 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นตัวตรวจจับสนองความเร็ว (velocity sensor) และส่วนที่ 2 เป็นตัวตรวจจับสนองอุณหภูมิ เมื่อสัญญาณจากทั้งสองตัวตรวจจับสนองถูกส่งไปยังส่วนประมวลผลอัตราการไหลมวล (mass flow rate) ณ จุดที่ทำกรวัดมีค่าเท่ากับ

$$q_m = \left[ \frac{1}{k_1} \left( \frac{\frac{E_v^2}{R_v}}{T_v - T} \right) - \frac{k_2}{k_1} \right]^{1/m}$$

เมื่อ

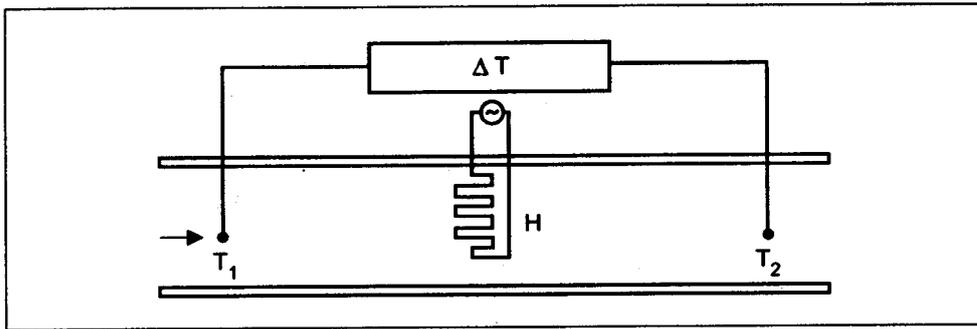
$k_1, k_2$  และ  $m$  เป็นค่าคงที่แล้วแต่ผู้ผลิต

$(T_v - T)$  คือผลต่างของอุณหภูมิถูกรักษาให้มีค่าคงที่โดยการใช้อำลังไฟฟ้า

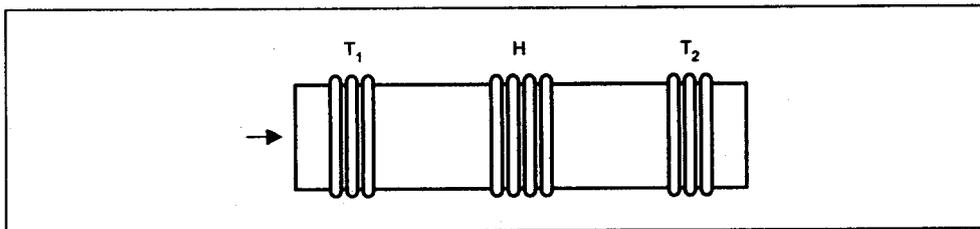
(Electrical Power) ที่เปลี่ยนแปลงไป  $\frac{E_v^2}{R_v}$

2.2. Calorimetric Meter หรือ Temperature Rise Flowmeter

มาตรวัดชนิดนี้ (ดูรูปที่ 2, 3 และ 4) ใช้หลักการวัดโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการ

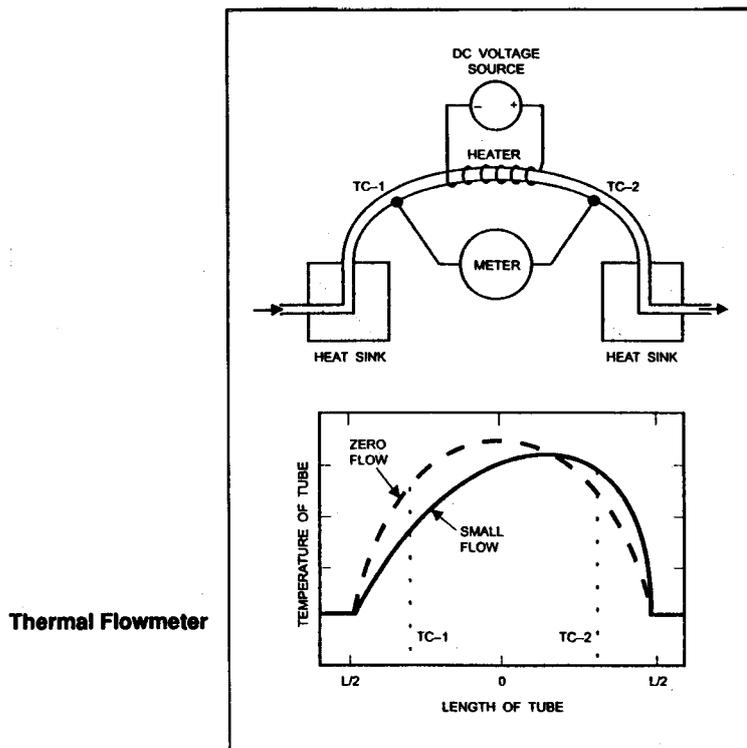


Thomas Flowmeter



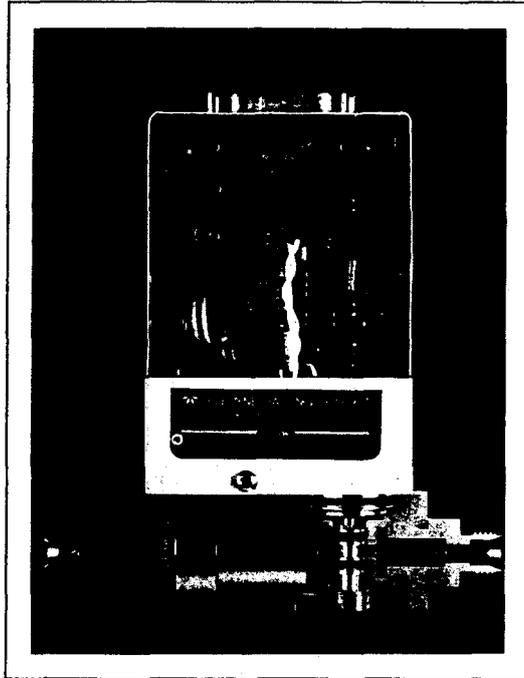
Laub Flowmeter

รูปที่ 2 แสดงหลักการทำงานของมาตรวัดมวลชนิด Temperature Rise Flowmeter



Thermal Flowmeter

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความยาวของท่อวัดของมาตรวัดมวลชนิด Thermal Flowmeter



**Flowmeter/Controller Cutaway View**  
(Courtesy of Teledyne Hastings-Raydist)

**รูปที่ 4** ภาพตัดของมาตรวัดมวล

กระจายของค่าความร้อน (thermal profile) ภายในของไหลที่ต้องการวัดอัตราการไหลมวล หรือทำการวัดอุณหภูมิของรูปแบบการไหล (flow stream) ซึ่งจะสูงขึ้นเมื่อไหลผ่านมาตรวัด โดยทำการติดตั้งตัวตรวจจับค่าอุณหภูมิ (temperature sensors) ด้านทางเข้าและทางออกมาตรวัด ตัวตรวจจับค่าอุณหภูมิจะทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของไหลเมื่อผ่านมาตรวัด ดังนั้นหลังจากทราบค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไหลระหว่างด้านทางเข้าและทางออกมาตรวัด เมื่อของไหลไหลผ่านแหล่งกำเนิดความร้อน (a heated grid or a heated tube) ก็สามารถรู้ค่าอัตราการไหลมวลดังกล่าว

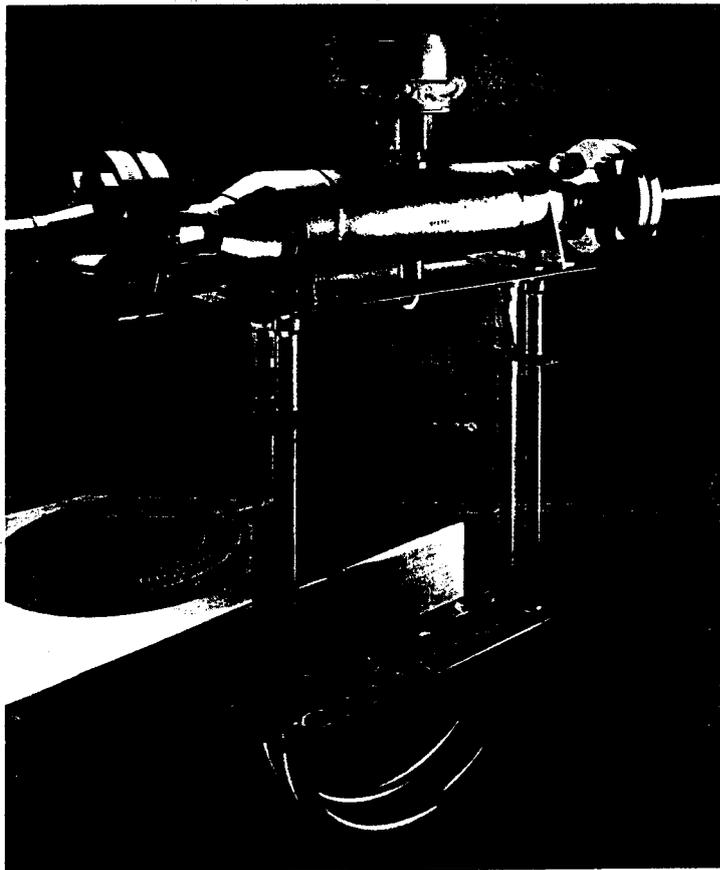
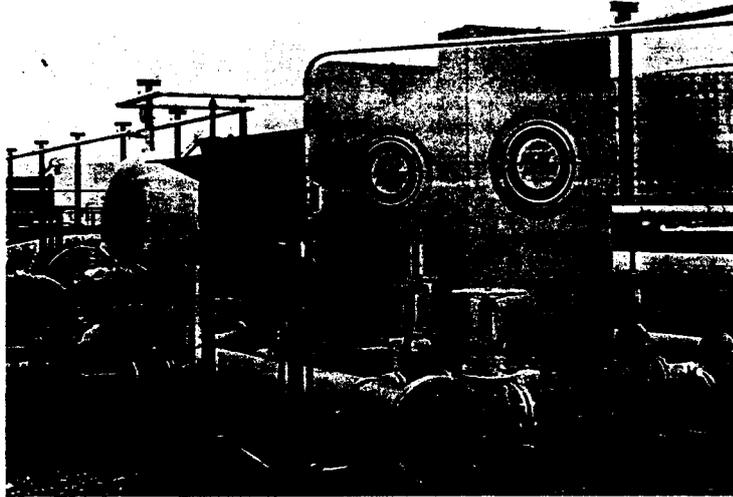
$$W = \frac{H}{(T_d - T_u)C_p} \quad (3)$$

เมื่อ

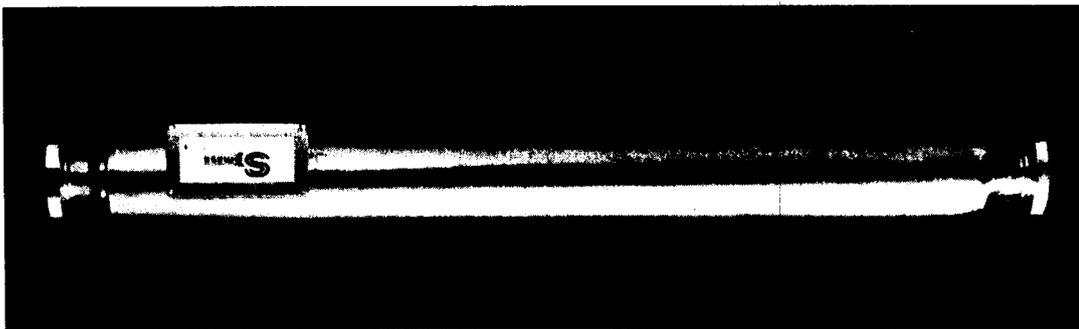
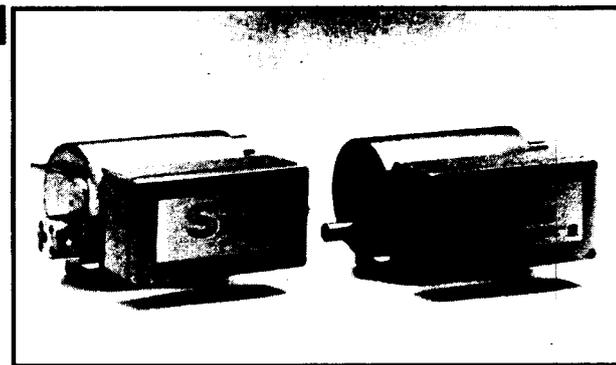
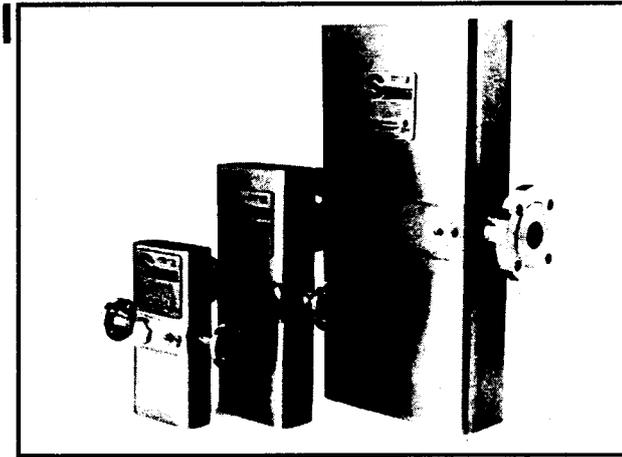
- W = อัตราการไหลมวล
- H = ความร้อนหรือพลังงานที่ป้อนเข้าไประบบ
- C<sub>p</sub> = ความร้อนจำเพาะของไหลที่ความดันคงที่ (specific heat at constant pressure)
- T<sub>d</sub> = อุณหภูมิด้านทางออก (downstream)
- T<sub>u</sub> = อุณหภูมิด้านทางเข้า (upstream)

3. **มาตรวัดมวลใช้หลักการ “True mass flow”** มาตรวัดมวลชนิดนี้ (ดูรูปที่ 5) ใช้หลักการการวิเคราะห์ผลของการเคลื่อนที่ในเชิงมุม (rotation movement) และการเคลื่อนที่

Oil Movement and Storage



รูปที่ 5 ลักษณะทั่วไปของมาตรวัดมวลชนิด True Mass Flowmeter ของ Micro Motion, Inc.



รูปที่ 6 ลักษณะทั่วไปของมาตรวัดมวลชนิด True Mass Flowmeter ของ Smith Meter Inc.

ในแนวรัศมี (radial motion) ของของไหล ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวของของไหลก่อให้เกิดความเร่งและความหน่วงด้านทางเข้าและด้านทางออกมาตรวัด (เรียก "coriolis acceleration" และ "coriolis deceleration") อันเนื่องมาจากแรงที่ของไหลกระทำต่อมาตรวัด โดยแรงดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามมวลของไหลที่ไหลผ่านมาตรวัด

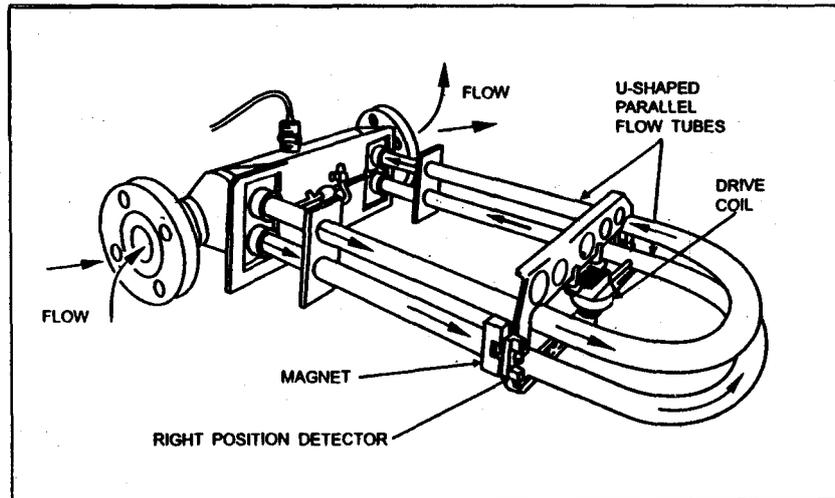
ดังนั้นมาตรวัดซึ่งใช้หลักการ "coriolis" ถือเป็นมาตรวัดมวลแท้จริงเนื่องจากมาตรวัดได้ใช้คุณสมบัติของมวลเพื่อทำการวัดมวล (mass) อีกทั้งง่ายต่อการนำไปใช้งานและขนาดไม่ใหญ่มากจนเกินไป เนื่องจากขั้นตอนการทำงานของมาตรวัดมวลไม่มีส่วนที่มีการเคลื่อนไหวขณะทำงาน รวมทั้งต้องการบำรุงรักษาต่ำมากและไม่ต้องการสอบเทียบ (calibration) บ่อยเมื่อเทียบกับมาตรวัดชนิดอื่นๆ ส่วนประกอบของมาตรวัดมวลที่เป็นส่วนเปียกอยู่ตลอดเวลาในช่วงการทำงานสามารถเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างหลากหลายเพื่อให้สามารถทนต่อของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อนรวมทั้งของเหลวที่มีของแข็งเจือปนอยู่ภายในของเหลวที่ทำการวัด หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าเราสามารถเลือกวัสดุของส่วนทำงานของมาตรวัดมวลซึ่งเปียกของเหลวอยู่ตลอดเวลาให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (corrosion) และเนื่องจากการเสียดสีหรือการกัดกร่อนทางกล (erosion) นอกจากนี้มาตรวัดมวล (coriolis mass flowmeter) ยังสามารถทำการวัดความหนาแน่นของเหลวขณะที่ทำการวัดอัตราการไหลมวลได้อีกด้วย ด้วยการอ้างอิงความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวซึ่งไหล ในแนวหนึ่ง (one component) ไปเป็นการไหล 2 ทิศทาง (a two-component flow stream) ในส่วนของหน่วยวัด (coriolis flowmeter sensor) ก็สามารถทำการออกแบบให้ใช้ได้กับสถานที่ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายสูง เช่น บริเวณภายในโรงกลั่นน้ำมัน เป็นต้น

ก่อนที่จะได้พูดถึงหัวข้อต่อไปก็ขอทำความเข้าใจกับผู้อ่านว่า ในหนังสือเล่มนี้เราจะเรียกมาตรวัดมวลซึ่งมีหลักการทำงานแบบ "coriolis" ว่า "มาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter)"

### **โครงสร้างของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter)**

เนื่องจากเทคนิคในการออกแบบของแต่ละบริษัทผู้ผลิตมีกันหลากหลายมาก ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะหลักการพื้นฐานหลักๆ ที่น่าสนใจ มาตรวัดมวลชนิดนี้ประกอบด้วย

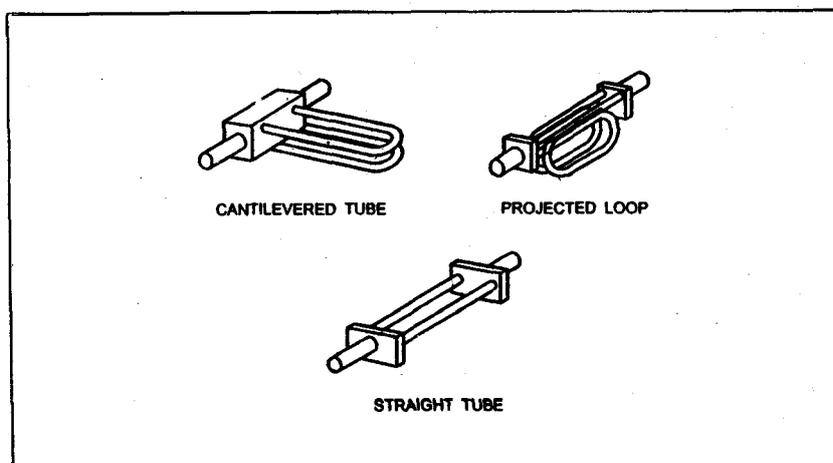
1. หน่วยวัด ("sensor unit" หรือ "tube sensor" หรือ "vibrating measuring section" ) นับว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อระบบการทำงานของมาตรวัดมวลคอริโอลิสอย่างมากว่าจะมีความแม่นยำสูงมากน้อยเพียงใด เหมาะสมกับการใช้งานหรือไม่ (ดูรูปที่ 7 และรูปที่ 8) ประกอบด้วย



**Typical Construction**  
(Courtesy of Micro Motion, Inc.)

รูปที่ 7 โครงสร้างประกอบของมาตรวัดมวล “True Mass Flowmeter” ของ Micro Motion, Inc.

1.1 ท่อวัด (measuring tubes) มีลักษณะเป็นท่อรูปตัว U , Omega หรือแบบต่างๆดังในรูปที่ 7, 8, 9, 10 และ 11 ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานแต่ละประเภท และปัจจัยที่สำคัญพบว่ารูปร่างของท่อวัดมีผลต่อความดันตกคร่อมมาตรวัดเช่นกัน เนื่องจากท่อวัดถูกทำให้ท่อสั้นด้วยความถี่ที่ค่าหนึ่งนั้น โดยปลายด้านหนึ่งของท่อวัดจะถูกยึดติดแน่นด้วยเหตุนี้ค่าความแข็ง (stiffness) ของท่อวัดของมาตรวัดชนิดนี้จึงนับเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ต้องพิจารณา หากคาบการสั่นหรือระยะเวลาการเคลื่อนที่ของท่อวัดสูงขึ้นค่าความแข็งของท่อวัดก็ยิ่งควรมีมากขึ้นเช่นกัน ในบางกรณีได้ทำการลดค่าความแข็ง (stiffness) ของท่อวัดโดยการเพิ่มความยาวท่อวัดให้ยาวมากขึ้นโดยทำให้มีรูปร่างแตกต่างหลากหลายรูปแบบดังรูป 8 เพื่อลดความยาว

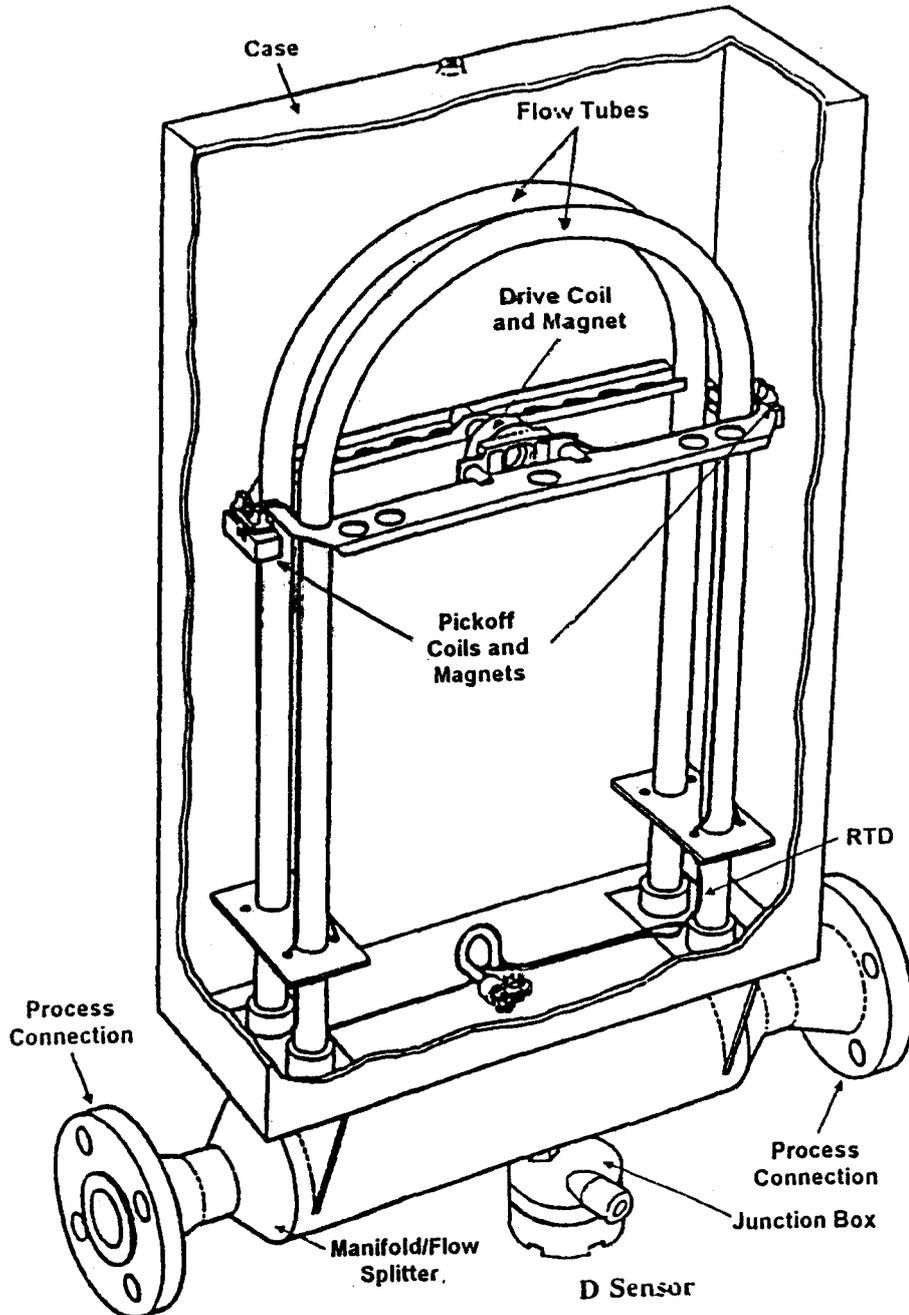


**Coriolis Flowmeter Flow Tube Configurations**  
(Courtesy of K-Flow)

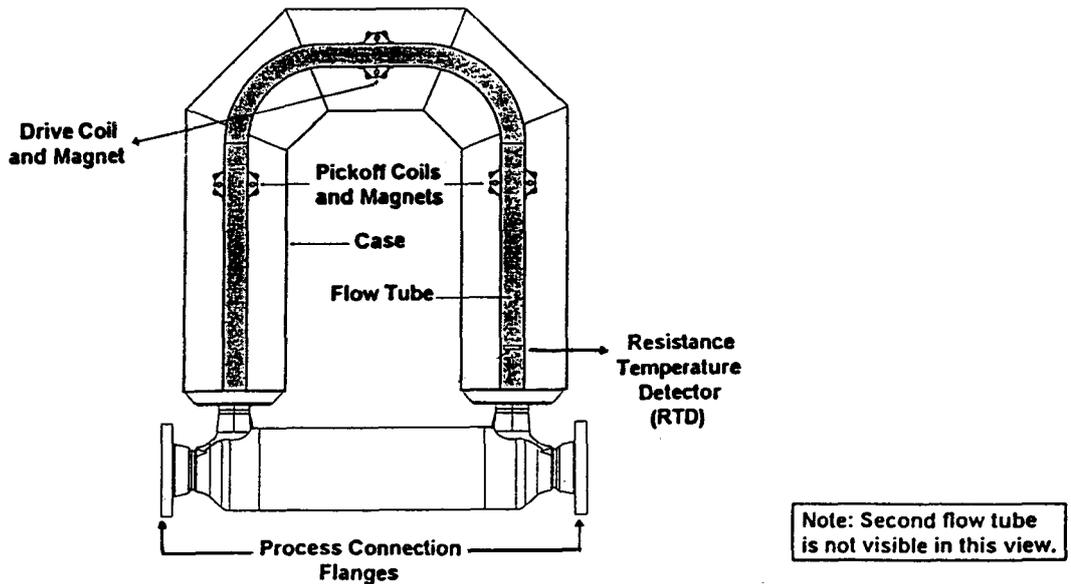
รูปที่ 8 รูปร่างลักษณะต่างๆ ของท่อวัดของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter)

ของชุดท่อวัดรวม (the overall laying length) แต่อย่างไรก็ตามผลที่ตามมา ก็คือเป็นการเพิ่มความดันตกหรือความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นเนื่องจากของเหลวไหลผ่านมาตรวัดเช่นกัน

ท่อวัดเป็นส่วนที่สัมผัสกับของเหลวโดยตรง ท่อทำด้วยวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อน ส่วนใหญ่มักจะทำด้วยท่อสแตนเลสแบบไม่มีตะเข็บ (seamless) 316L หรือท่อ 316L เคลือบภายในท่อด้วยสารจำพวกไม่เป็นโลหะ(non-metallic) เช่น Tefzel® นอกจากนี้ท่ออาจทำด้วย titanium , Hastelloy® และ tantalum เพื่อใช้ทดแทนท่อสแตนเลส (stainless steel pipes) ในกรณีที่ท่อสแตนเลสไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ เป็นต้น



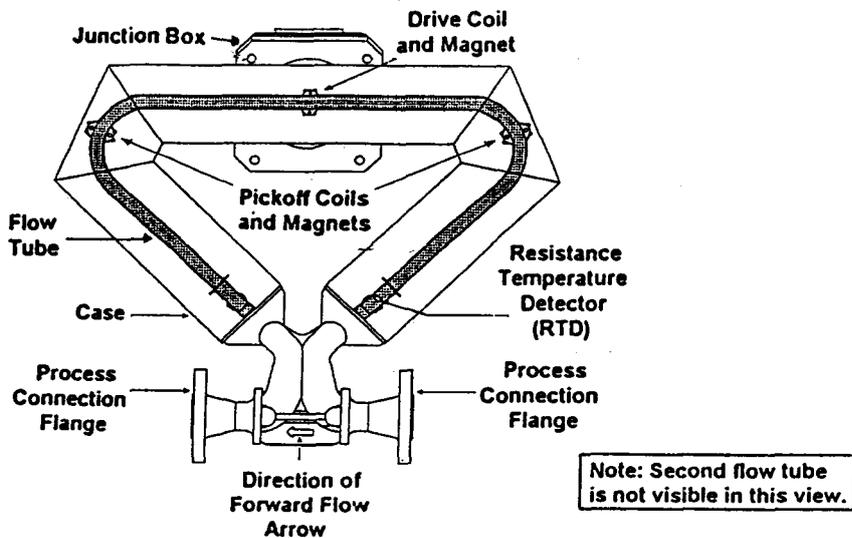
รูปที่ 9 หน่วยวัดของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) Model "D" ของ Micro Motion, Inc.



**ELITE Sensor (CMF200, CMF300)**

รูปที่ 10 หน่วยวัดของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter)

Model "ELITE" ของ Micro Motion, Inc.



**ELITE Sensor (CMF025, CMF050, CMF100)**

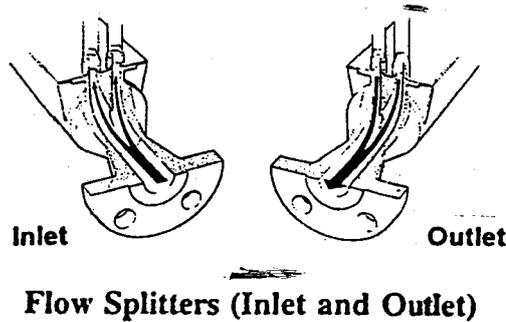
รูปที่ 11 หน่วยวัดของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter)

Model "ELITE" ของ Micro Motion, Inc. อีกรุ่นหนึ่ง

1.2. ตัวแบ่งการไหล (Flow splitter) ในกรณีมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ประกอบด้วยท่อวัดจำนวน 2 ท่อ มาตรวัดแบบนี้มีข้อดีมากในการที่จะลดอิทธิพลจากแรงสั่นสะเทือนจากภายนอกมารบกวนการทำงานของมาตรวัดชนิดนี้ โดยด้านปลายท่อวัด (tube sensors) ทั้งหมดจะถูกเชื่อมติดอยู่กับตัวแบ่งการไหล (flow splitter) ซึ่งตัวแบ่งการไหลนี้จะต่อกับระบบท่อของเหลวที่ต้องการวัดอัตราการไหล และทำหน้าที่แบ่งของเหลวเมื่อไหลเข้ามาตรวัดมวลออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกันให้ไหลผ่านท่อวัดทั้ง 2 จากนั้นทำการรวมของเหลวที่ไหลออกจากท่อวัดทั้ง 2 กลับคืนสู่ระบบท่อของเหลวเหมือนเดิม ดูรูปที่ 9 และรูปที่ 12

ประกอบ ในการออกแบบส่วนใหญ่จะทำการติดตั้งแผ่นโครงยึดท่อวัดทั้ง 2 ทั้งด้านเข้าและด้านออกบริเวณใกล้จุดเชื่อมต่อท่อวัดกับตัวแบ่งการไหล ทั้งนี้เนื่องจากเพื่อป้องกันความสั่นสะเทือนของระบบท่อภายนอกซึ่งมาตรวัดมวลติดตั้งอยู่ถ่ายทอดเข้าสู่ท่อวัดหรือในทางกลับกัน ในการออกแบบมาตรวัดบางรุ่นพบว่าจะมีความเครียด (stress) เกิดสูงสุดบริเวณรอยต่อเชื่อมระหว่างท่อวัดกับตัวแบ่งการไหลนี้เอง

ด้วยเหตุนี้มาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) จึงสามารถทำการวัดอัตราการไหลได้ทั้ง 2 ทิศทางด้วยกัน โดยเมื่อต้องการกลับทิศการไหลของเหลวที่ต้องการวัดก็เพียงแค่สลับสายไฟภายในตัวถ่ายถอดสัญญาณ (RFT) บางเส้นเท่านั้น



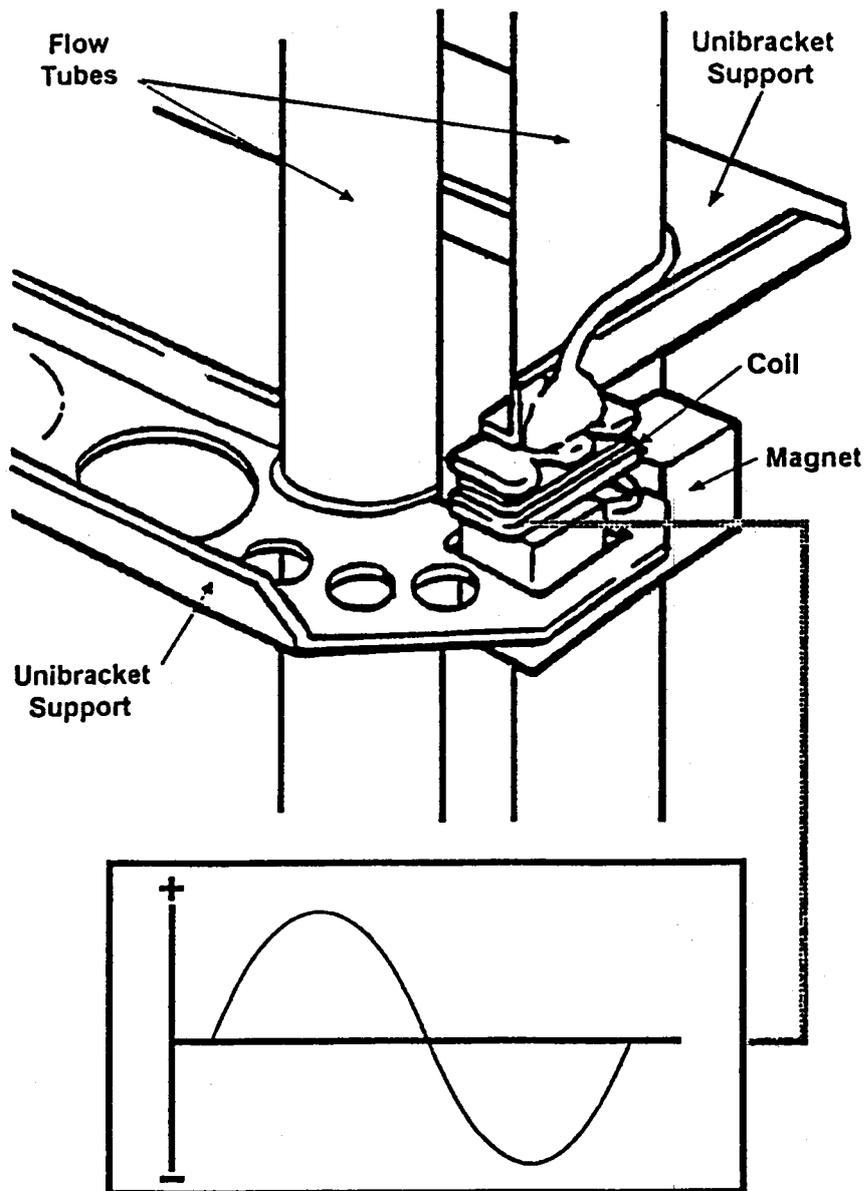
รูปที่ 12 ตัวแบ่งการไหล (flow Splitter)

1.3. **ตัวกำเนิดสั่นสะเทือน (Drive coil)** จะถูกติดตั้งไว้บริเวณกึ่งกลางท่อวัดทั้ง 2 (ดูรูปที่ 7 และ 9) โดยทำการติดตั้งตัวกำเนิดสั่นสะเทือนจำนวน 1 ตัว เข้ากับท่อวัดท่อหนึ่งและติดตั้งแม่เหล็กซึ่งมีขั้วต่างกับขั้วของตัวกำเนิดสั่นสะเทือน (opposing magnet) บนอีกท่อหนึ่งเพื่อให้ท่อวัดทั้งสองมีการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติที่มีเฟสการสั่นแตกต่างกัน 180 องศา เพื่อจะช่วยลดการสั่นของระบบมาตรวัดมวลให้น้อยลงอีกทั้งยังก่อให้เกิดความสมดุลภายในระบบของหน่วยวัดด้วย

1.4. **ตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ (Motion sensors)** ทำการติดตั้งตัวตรวจจับการเคลื่อนที่บริเวณขาท่อวัดทั้งสองทั้งทางด้านเข้าและด้านออกของเหลว เพื่อทำการตรวจจับการเคลื่อนที่ของขาท่อวัดทั้ง 2 ท่อแต่ละด้าน ตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่เป็น electromagnetic (ดูรูปที่ 9 และ 13) ถึงแม้บริษัทผู้ผลิตบางรายจะทำการพัฒนาให้มีการใช้ optical sensors เพื่อใช้ทดแทน electromagnetic บ้างแล้วก็ตาม หลังจากตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ตรวจจับการเคลื่อนที่ของท่อวัดก็จะส่งสัญญาณไปเปรียบเทียบกับในทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อหาค่าปริมาณการบิดตัวของท่อวัด (coriolis twist)

สำหรับมาตรวัดของ micro motion ,Inc. จะมีตัวตรวจจับการเคลื่อนที่บริเวณขาท่อวัดทั้งทางด้านเข้าและด้านออกของท่อ จำนวน 2 ชุด โดยแต่ละชุดประกอบด้วย magnet และ coil เมื่อทำการติดตั้ง magnet เข้ากับท่อหนึ่งจะต้องทำการติดตั้ง coil กับอีก

ท่อหนึ่งตรงข้ามกันเพื่อที่จะสามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ได้ โดยทั้ง magnet และ coil จะมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันเมื่อท่อวัดเกิดการบิดตัวอันเนื่องจากของเหลวไหลผ่านท่อวัดซึ่งถูกกระตุ้นให้สั่นด้วยความถี่ธรรมชาติด้วยความถี่คงที่อยู่ตลอดเวลา เมื่อ coil เคลื่อนที่ไปด้านหน้าและหลังตัดผ่านสนามแม่เหล็กคงที่ (uniform field of magnet) ของส่วน magnet ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นภายใน coil เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นภายใน coil เทียบกับคาบเวลา เมื่อมองผ่านจาก oscilloscope รูปร่างคล้ายกับ SINE WAVE ดังรูปที่ 13



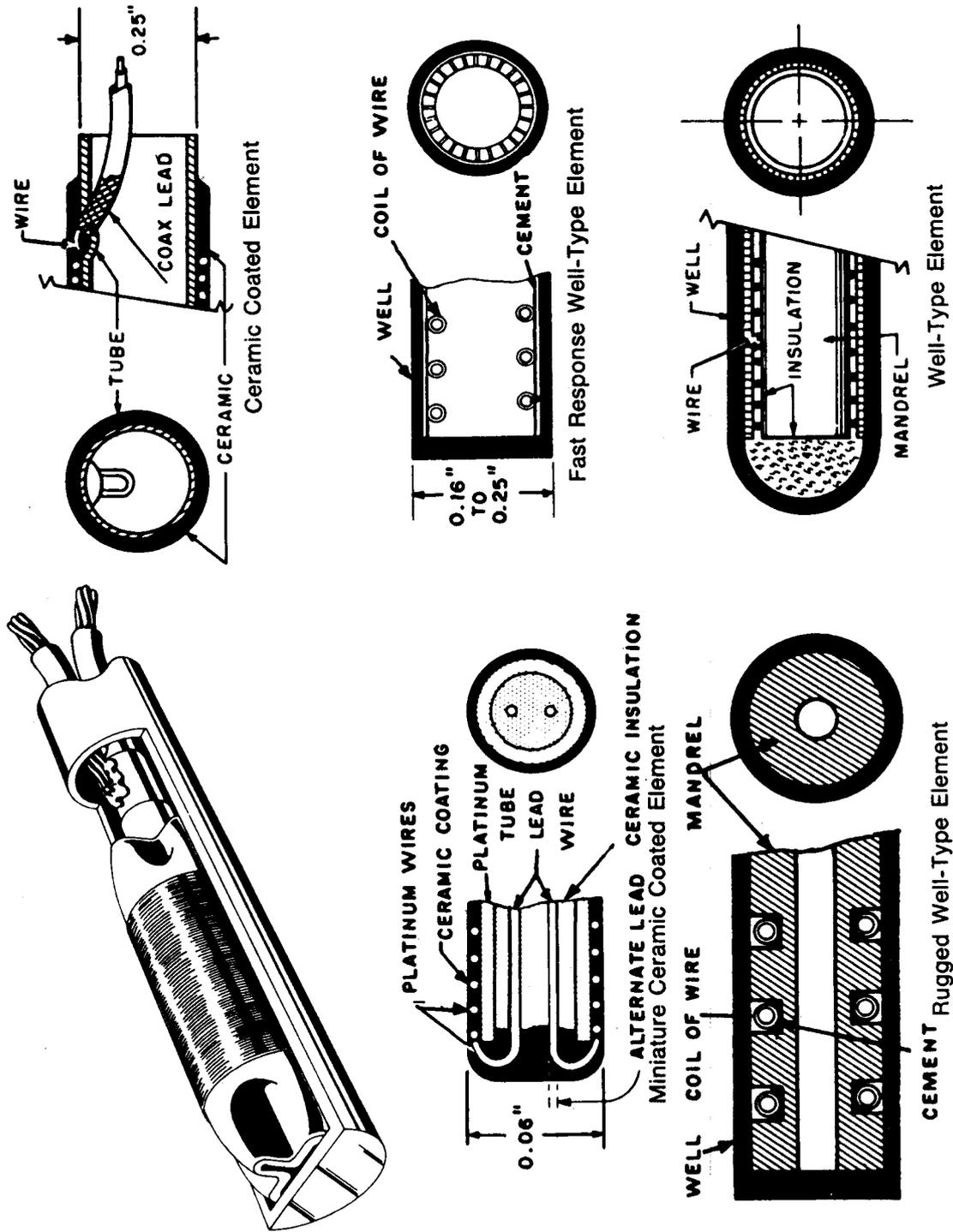
**Sensor Pickoff Elements**

**รูปที่ 13** ตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ (Motion Sensors)

พิจารณารูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นกับ  
คาบเวลา พบว่า

- ที่ความสูงของคลื่นที่เวลาใดๆ หมายถึงความเร็วสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของ  
ท่อนำของท่อทั้ง 2 เมื่อเทียบซึ่งกันและกัน ณ เวลานั้น ในส่วนที่เป็นจุด  
สูงสุดและจุดต่ำสุดของกราฟนั้นหมายถึงท่อวัดทั้งสองมีการเคลื่อนที่ด้วย  
ความเร็วสัมพันธ์สูงสุด (relative velocity) ซึ่งตำแหน่งนี้เกิดขึ้นเมื่อท่อวัดมี  
การเคลื่อนที่ผ่านจุดกึ่งกลางของเส้นทางการเคลื่อนที่ของท่อวัดทั้งสองในแต่  
ทิศทาง แต่ค่าความเร็วสัมพันธ์ของท่อวัดนั้นไม่สามารถบอกได้จากกราฟนี้
- เครื่องหมายขั้ว (polarity) บ่งบอกถึงตำแหน่งของท่อวัดว่าตำแหน่งอยู่เหนือ  
หรือใต้แนวกึ่งกลาง อีกทั้งแสดงให้เห็นถึงทิศทางของการเคลื่อนที่สัมพันธ์ ณ  
เวลานั้น ว่า ท่อวัดทั้ง 2 มีการเคลื่อนที่เข้ากัน หรือเคลื่อนที่หนีออกจากกัน  
สำหรับตำแหน่งที่ค่าความสูงของคลื่นมีค่าเท่ากับ ศูนย์ (zero line) นั้น  
หมายถึงท่อวัดเคลื่อนที่มาอยู่ตำแหน่งพักที่สัมพันธ์กัน หรือถึงจุดสุดเขตของ  
การเคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางหนึ่งๆ แต่ไม่สามารถบอกระยะของการเคลื่อนที่  
ได้จากกราฟนี้เช่นกัน
- สำหรับสถานะไม่มีการไหล (No flow condition) ท่อวัดจะมีกราฟความ  
สัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นภายใน coil เทียบกับคาบ  
เวลาเหมือนกันและเท่ากันทุกๆ จุดเมื่อเวลาผ่านไป

1.5. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature sensors) มาตราวัดจะมีเครื่อง  
วัดอุณหภูมิติดอยู่บริเวณผิวภายนอกท่อวัดประจำท่อวัดท่อใดท่อหนึ่ง ส่วนใหญ่แล้วจะติดตั้งกับ  
ท่อวัดบริเวณใกล้ทางเข้าของเหลวด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ เช่น เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Resistance  
Temperature Detector (RTD) (ดูรูปที่ 14) โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าเล็กน้อยค่าคงที่ค่าหนึ่งไปยัง  
RTD และทำการวัดค่าความต้านทานเก็บไว้อย่างต่อเนื่อง จากหลักการที่ว่าความต้านทานไฟฟ้า  
ของตัวนำจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ด้วยเหตุนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจาก  
ความต้านทานเปลี่ยนแปลงนั้นจะเป็นตัวบอกค่าอุณหภูมิของท่อวัดนั้นๆ



RTD elements are fabricated to minimize the effects of mechanical shock. (Courtesy of Rosemont, Inc.)

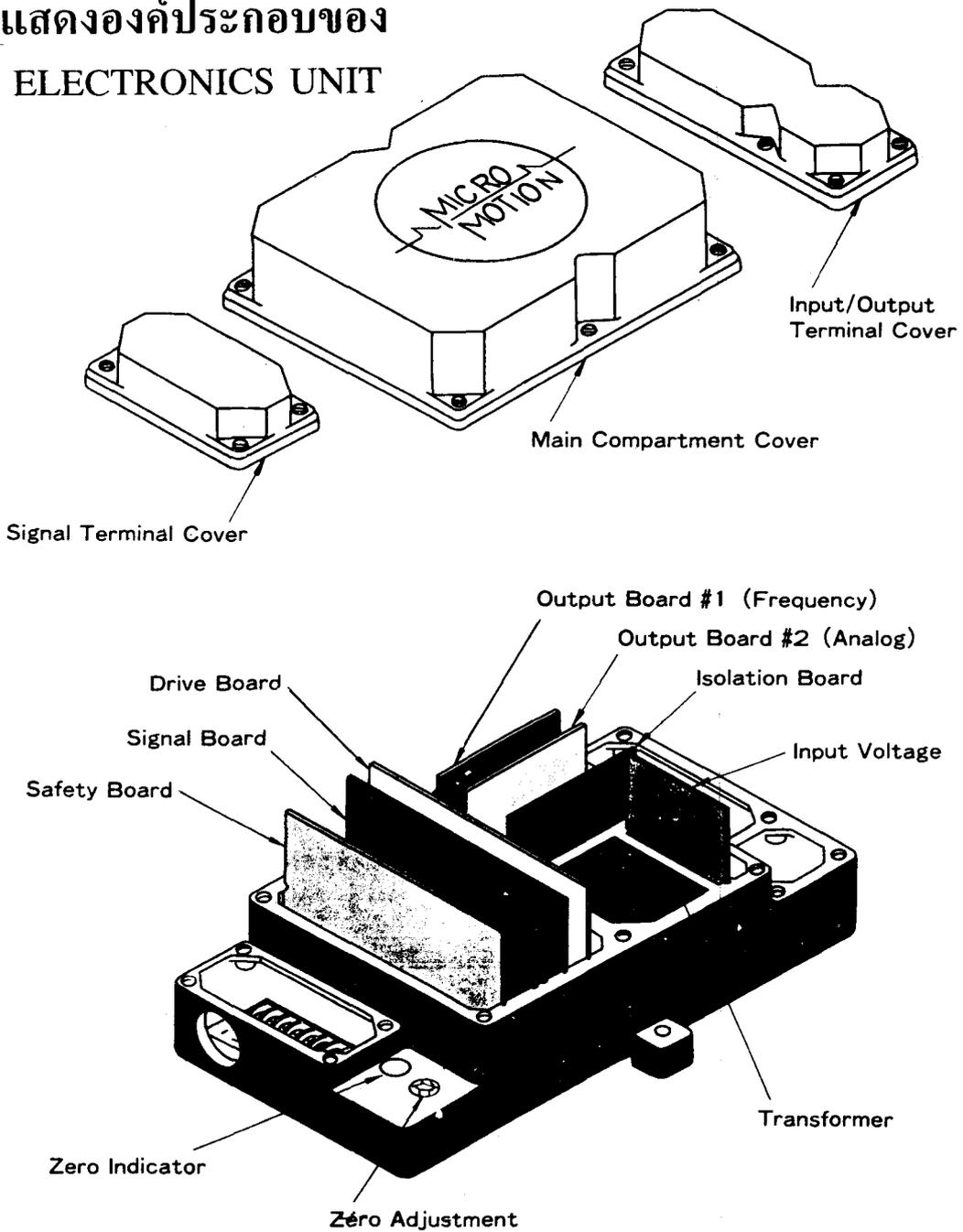
รูปที่ 14 เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Resistance Temperature Detector (RTD) ในรูปแบบต่างๆ

เนื่องจากค่าความแข็ง (stiffness) ของท่อวัด ซึ่งวัดค่าเป็น “modulus of elasticity” จะมีผลต่อท่อวัดในเรื่องของการบิดตัวของท่อวัดเมื่อของเหลวไหลผ่านท่อวัดซึ่งถูกกระตุ้นให้สั่นด้วยความถี่ธรรมชาติอย่างสม่ำเสมอคงที่ค่าหนึ่ง หรือที่เรียกว่า “Coriolis effect” นั้นเอง รวมทั้งค่าความคงรูป (rigidity) ของท่อวัดซึ่งวัดค่าเป็น “modulus of rigidity” ซึ่งค่าดังกล่าวนี้มีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นของท่อวัดหรือการหาค่าความหนาแน่นของเหลวโดยมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) แต่ไม่ว่าทั้งค่า modulus of elasticity และค่า modulus of rigidity ต่างได้รับผลกระทบอย่างมากเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง นั้นหมายถึงส่งผลให้การทำงานของมาตรวัดมวลคอริโอลิสขาดความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิภายในมาตรวัดดังกล่าว ซึ่งจะนำค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นชดเชยค่า spring constant หรือ modulus of elasticity ในการคำนวณหาค่าอัตราการไหลมวล และชดเชยค่า modulus of rigidity ในการหาความหนาแน่นของเหลว

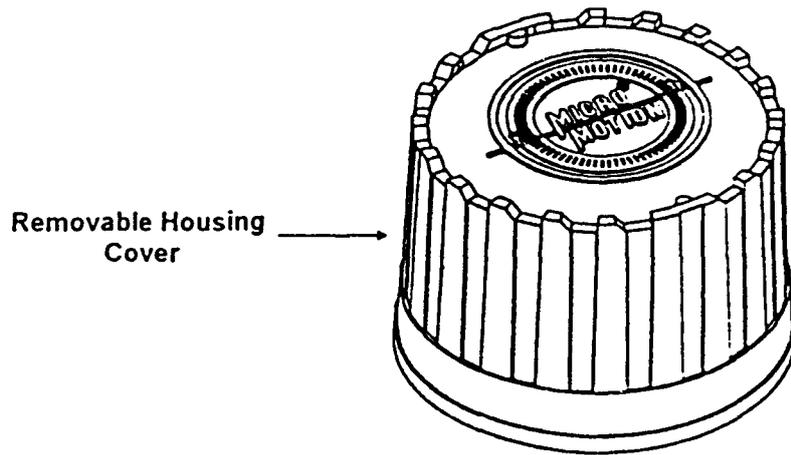
1.6: **ตัวเรือน (casing)** ตัวเรือน (ดูรูปที่ 9) ของมาตรวัดมวลมีหน้าที่หลักคือป้องกันอุปกรณ์ท่อวัด, ตัวแบ่งการไหล (Flow splitter), ตัวกำเนิดคลื่นสะท้อน (Drive coil), ตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ (Motion sensors) และเครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature sensors) จากสิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อการทำงานหรือเกิดการกัดกร่อนต่ออุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งได้ ปกติแล้วตัวเรือนทำด้วยเหล็กสแตนเลส

2. **หน่วยอิเล็กทรอนิกส์** ในการเดินสายสัญญาณจากตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ (motion sensors) , เครื่องวัดอุณหภูมิ (temperature sensor) หรือสายไฟฟ้ากำลังป้อนให้กับตัวกำเนิดคลื่นสะท้อน (drive coil) ภายในหน่วยวัด จะถูกลากสายผ่านตัวเรือนมาตรวัดมวลซึ่งจำเป็นต้องมีการซีลอย่างมิดชิดเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟขณะทำงาน หรือให้ได้เป็นไปตามมาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้าตามข้อกำหนดสถานที่ใช้งาน ถัดจากสายส่งสัญญาณซึ่งออกจากหน่วยวัดจะมีอุปกรณ์ถ่ายทอดสัญญาณ (electric transmitter หรือ *Remot Flow Transmitter (RFT)*) (ดูรูปที่ 16) ซึ่งจะเป็นตัวรับสัญญาณทั้งหมด และจะประมวลผลสัญญาณอย่างไรหรือจะส่งสัญญาณไปยังหน่วยอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งอาจจะอยู่ไกลจากจุดที่ทำการติดตั้งมาตรวัดมวลก็ขึ้นอยู่กับโปรแกรมที่กำหนดไว้ก่อนหน้า แต่ทั้งนี้และทั้งนั้นก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องระยะทางระหว่างหน่วยวัดกับตัวอุปกรณ์ถ่ายทอดสัญญาณ (electric transmitter) ด้วยซึ่งต้องให้ความสนใจด้วยเช่นกัน เพราะหากมีการเดินสายสัญญาณไกลเกินกว่าที่กำหนดจะทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณที่ส่งมาจากหน่วยวัด (sensors) ได้เช่นกัน ในบางบริษัทกำหนดไว้ให้ระยะห่างระหว่างหน่วยวัดกับอุปกรณ์ถ่ายทอดสัญญาณ (electric trasmitter) ไม่ควรเกินกว่า 240 เมตร (800 ฟุต) เป็นต้น

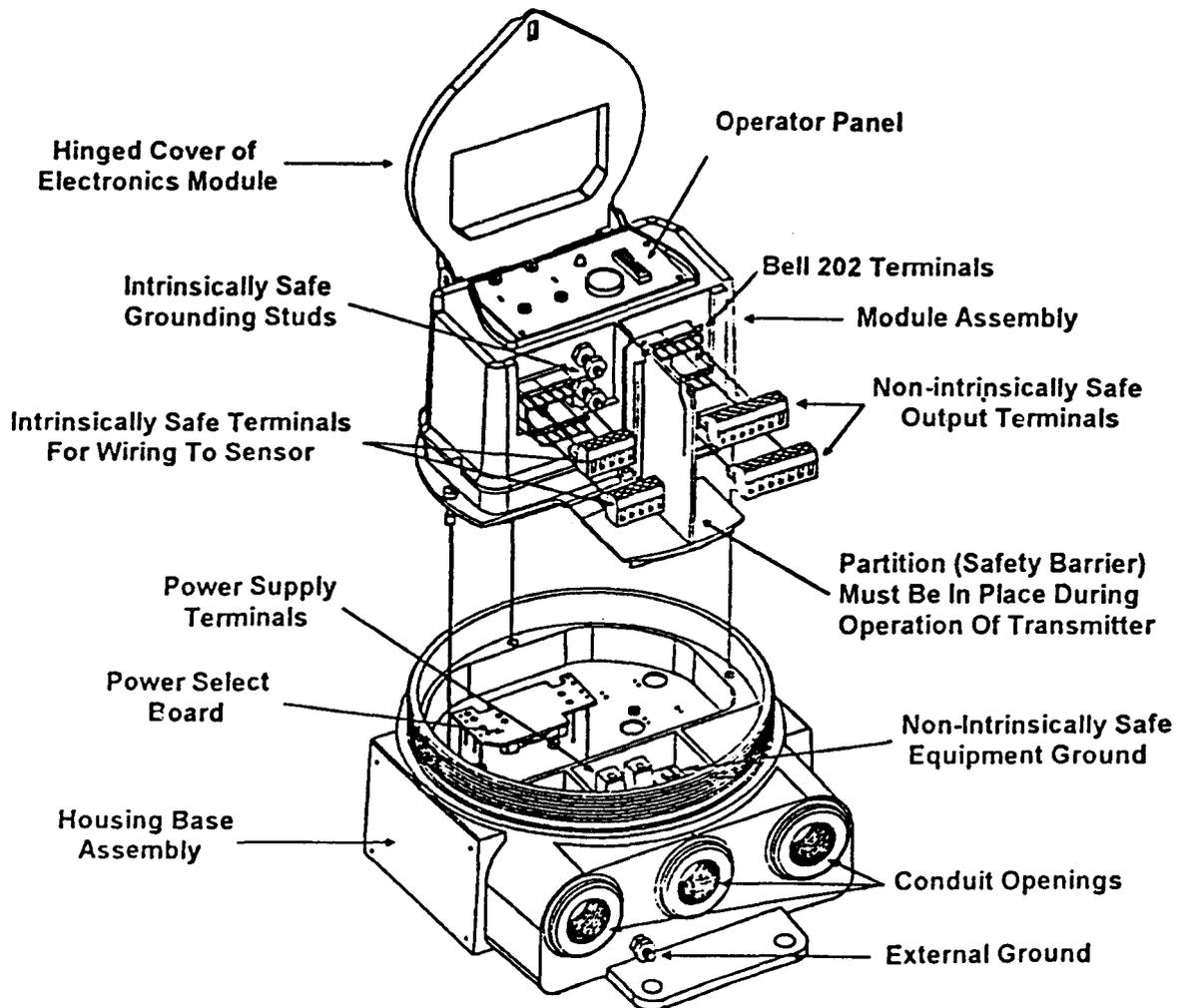
แสดงองค์ประกอบของ  
ELECTRONICS UNIT



รูปที่ 15 แสดงองค์ประกอบของ Electronic Unit



Removable Housing Cover

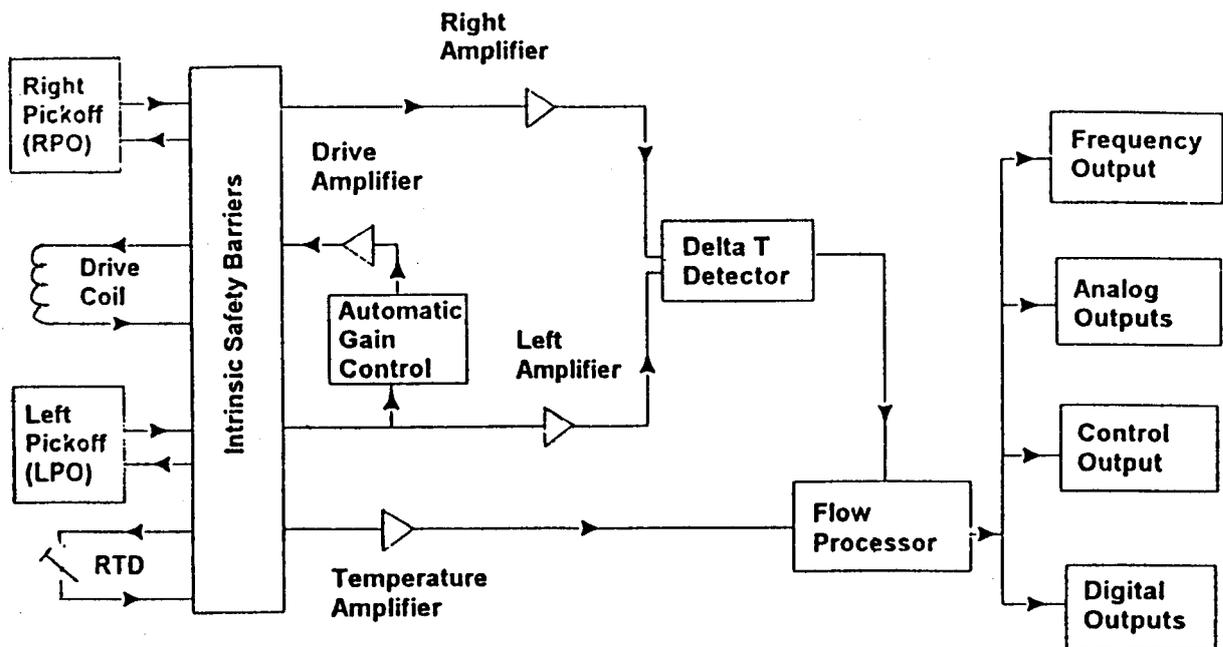


Field-Mount RFT9739 (Exploded View)

รูปที่ 16 อุปกรณ์ถ่ายถอดสัญญาณ (coriolis transmitter หรือ Remote Flow Transmitter;RFT)

เนื่องจากการทำงานของมาตรวัดมวลในส่วนของหน่วยวัดต้องการพลังงานในการก่อกำเนิดการสั่นสะเทือนกับตัวท่อวัด ด้วยเหตุนี้จึงมีทั้งสายไฟฟ้ากำลังและสายสัญญาณต่อเชื่อมระหว่างหน่วยวัดและหน่วยอิเล็กทรอนิกส์ แต่ส่วนใหญ่ต้องการสายส่งไฟฟ้ากำลังแยกออกไปยังหน่วยวัดต่างหาก ซึ่งมาตรวัดมวลในท้องตลาดจะมีทั้งทำงานด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนใหญ่มาตรวัดมวลชนิดนี้ต้องการกำลังประมาณ 10 watts ในการทำงาน แต่อย่างไรก็ตามก็ต้องพิจารณาข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตอีกครั้งเพื่อความแน่นอน

หน่วยอิเล็กทรอนิกส์นี้จะมีหน้าที่ควบคุมการสั่นของท่อวัดภายในหน่วยวัดให้สั่นที่มีความถี่ธรรมชาติอย่างสม่ำเสมอที่ตลอดช่วงการวัด รับสัญญาณจากหน่วยวัดและแปลงเป็นสัญญาณมาตรฐานก่อนส่งออกไปอีกที สัญญาณที่ส่งออกมานี้มีทั้งสัญญาณแบบ analog ขนาด 4-20 mA และ pulsed frequency ซึ่งสามารถต่อสัญญาณนี้ไปยังอุปกรณ์อื่นๆ เช่น เครื่องควบคุม (controller) และ/หรือ เครื่องแสดงผล (indicator & totalizer) (ดูรูปที่ 17) เพื่อประโยชน์ในการใช้งาน



**Remote Flow Transmitter Signal Processing Diagram**

รูปที่ 17 ขั้นตอนการแปลงสัญญาณของอุปกรณ์ถ่ายทอดสัญญาณ (coriolis transmitter หรือ Remote Flow Transmitter;RFT)

มาตรวัดมวลในท้องตลาดมีการออกแบบเพื่อให้สามารถใช้งานได้ในพื้นที่อาจเกิดอันตรายได้ง่ายเช่น บริเวณส่วนกลั่นน้ำมันของโรงกลั่น หรือบริเวณจ่ายน้ำมันทางเรือ หรือทางรถ ซึ่งตัวของหน่วยวัดสามารถออกแบบให้ใช้งานได้ถึง DIV I ส่วนอุปกรณ์ถ่ายถอดสัญญาณอาจสามารถทำงานได้ถึง DIV II (ตามมาตรฐาน IEEE) แต่อย่างไรก็ตามก็ควรปรึกษากับบริษัทผู้ผลิตเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องก่อนที่จะดำเนินการจัดซื้อ

พอสรุปหน้าที่หลักของอุปกรณ์ถ่ายถอดสัญญาณ (Coriolis transmitters หรือ Remot Flow Transmitter (RFT)) คือ

1. รับสัญญาณและประมวลผลสัญญาณจากหน่วยวัด (sensor unit)
2. ส่งผลออกไปยังอุปกรณ์ทำงานร่วม เช่น เครื่องควบคุม (controllers) และ/หรือ เครื่องแสดงผล (indicator & totalizer)
3. ส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังหน่วยวัด (sensor unit) เพื่อกระตุ้นและรักษาภาวะการสั่นของท่อวัดให้ยังคงสั่นที่ความถี่ธรรมชาติเสมอ นั้นหมายถึงเมื่อความหนาแน่นของเหลวไหลผ่านท่อวัดเปลี่ยนแปลง จะทำให้ความถี่ธรรมชาติของการสั่นของท่อวัดเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงมีระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อเพิ่มขึ้นหรือลดความถี่การสั่นของท่อวัด

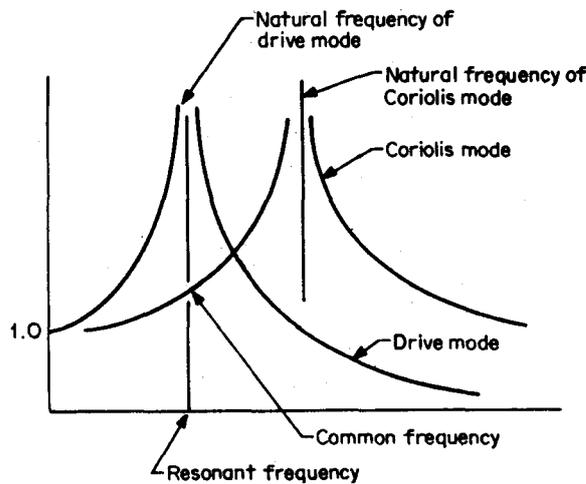
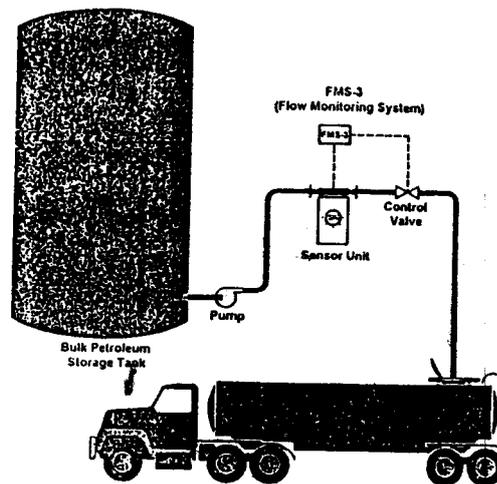


Figure Coriolis and drive mode frequency relationships.

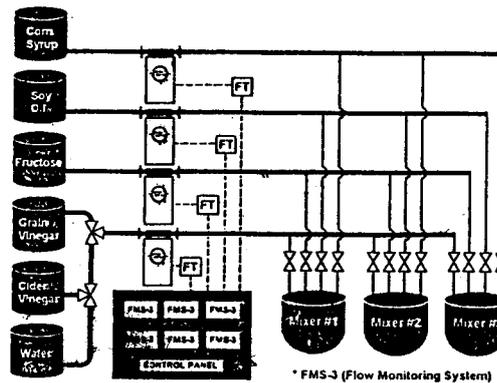
รูปแสดงเปรียบเทียบการสั่นของระบบหน่วยวัด ระหว่างเมื่อท่อวัดสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติคงที่ค่าหนึ่ง กับเมื่อมวลของเหลวขณะทำการวัดมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความหนาแน่นของเหลวเปลี่ยน ด้วยเหตุนี้บริษัทผู้ผลิตต้องกำหนดช่วงความหนาแน่นที่มาตรวัดมวลยังคงทำงานได้

อย่างมีประสิทธิภาพด้วย เพราะหากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเหลวอยู่ภายในช่วงที่กำหนด RFT หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะทำงานเพื่อรักษาการสิ้นของท่อวัดให้สั้นด้วยเวลาที่ธรรมชาติคงที่ค่าหนึ่ง

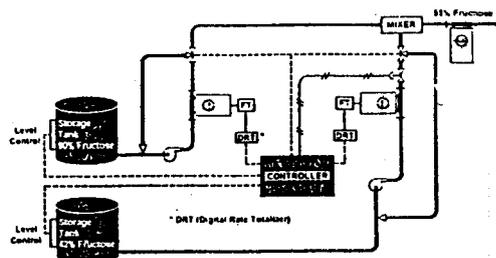
3. **อุปกรณ์เสริม** ในบริษัทผู้ผลิตบางรายจะมีอุปกรณ์เสริม เช่น Transmitter interface เพื่อใช้งานในการตรวจสอบตัวแปรต่างๆในช่วงระหว่างการทำงาน , การติดตั้งมาตรวัดตลอดจนการตรวจเช็คปัญหาการทำงานและการติดตั้งต่างๆที่อาจมีเกิดขึ้นในช่วงการทำงานของมาตรวัด



Typical Custody Transfer Application



Typical Batching Application



Typical Continuous Blending Application

รูปที่ 18 การประยุกต์ใช้งานของมาตรวัดมวลคอรียอริส (coriolis mass flowmeter) รูปแบบต่างๆ

# บทที่ 2

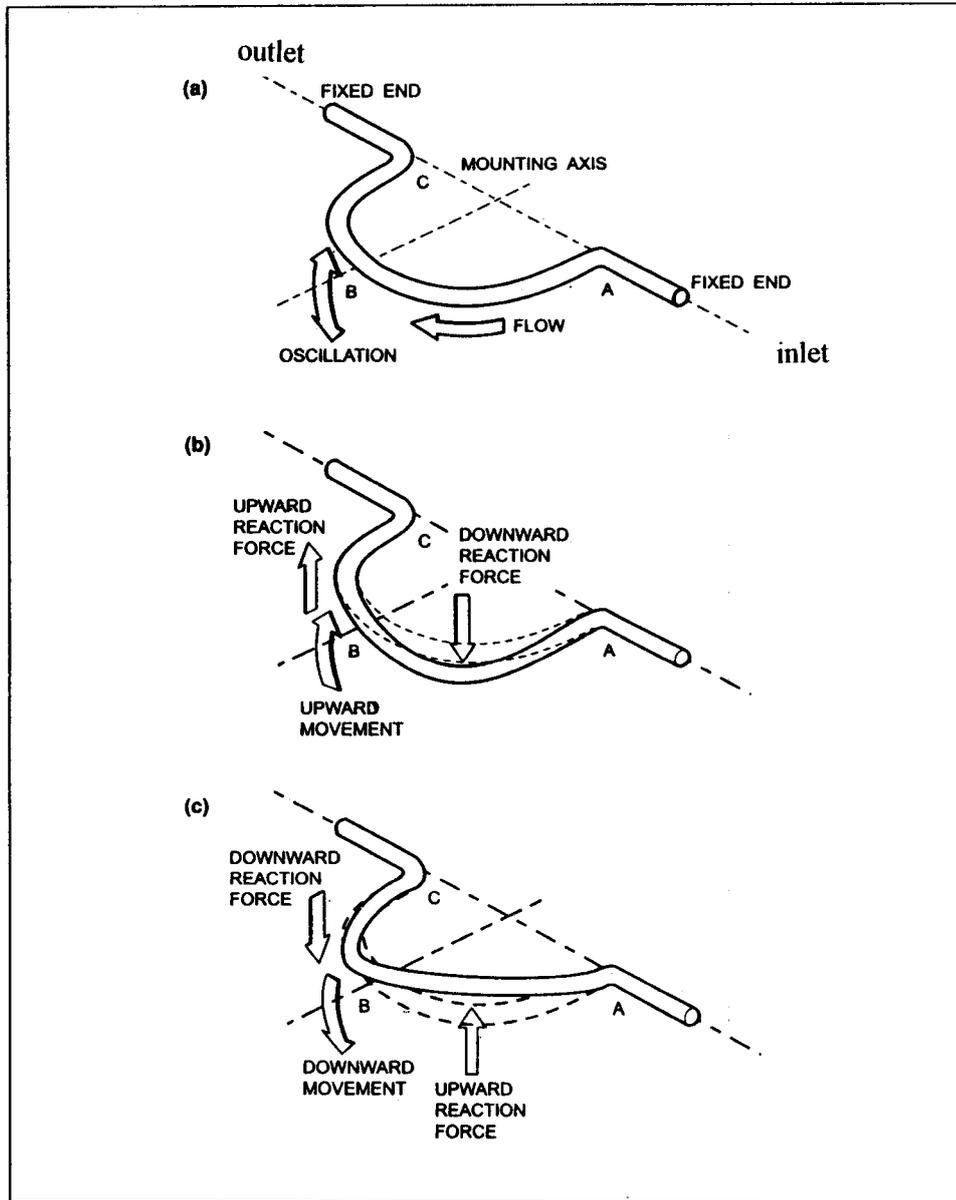
## หลักการทํางาน

(Principle of Operation)

### หลักการทํางาน (Principle of Operation)

เนื่องจากมาตรวัดมวลซึ่งมีหลักการทํางานด้วย “coriolis” ได้ถูกผลิตออกมาด้วยกันหลากหลายรูปร่าง (shapes), ขนาด (sizes) และวัสดุที่แตกต่างกันหลากหลาย ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้มีผลต่อความรู้สึกไว (sensitivity) ของมาตรวัดมวลในการวัดอัตราการไหล แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีหลักการพื้นฐานในการทํางานเหมือนกัน กล่าวคือมาตรวัดมวลคอริโอลิสใช้หลักการทํางานพื้นฐานของการเคลื่อนไหวนៃของหน่วยวัด เมื่อของเหลวไหลผ่านท่อวัดที่มีการสั่นเนื่องจากการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (electromagnetic devices) หรือ ตัวกำเนิดคลื่นสะเทือน (drive coil) ให้สั่นที่ amplitude ประมาณ 1/10 นิ้ว (2.5 มิลลิเมตร) ด้วยความถี่ประมาณ 80 -100 เฮิรตซ์ หรือแล้วแต่บริษัทผู้ผลิต ของเหลวดังกล่าวจะเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับท่อวัดและถูกทำให้มีความเร่งและทำให้ของเหลวเคลื่อนไปยังจุดยอดสุดของคลื่นการสั่น (point of peak amplitude of vibration) ของท่อวัด แต่ในทางกลับกันของเหลวจะถูกหน่วงลงเมื่อของเหลวเคลื่อนหนีออกจากจุดยอดสุดของคลื่นการสั่น ในขณะที่เดียวกันเมื่อของเหลวที่เคลื่อนที่เข้าสู่ท่อวัดที่มีการสั่นของเหลวก็มีแรงกระทำต่อท่อวัดด้านทางเข้าด้วยเช่นกันซึ่งแรงดังกล่าวนี้จะไปต้านทานต่อการเพิ่มความเร่งของเหลว ส่งผลให้ท่อวัดเมื่อมีของเหลวไหลเข้ามามีการสั่นล่าช้ากว่าเมื่อท่อวัดสั่นโดยไม่มีของเหลวไหลผ่านเข้ามา หากพิจารณาทางด้านทางออกของท่อวัดจะมีแรงกระทำต่อของเหลวที่ไหลออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่เนื่องจากของเหลวมีความเฉื่อยต้านทานต่อการหน่วงให้มีการไหลให้ช้าลง ซึ่งแรงต้านด้านทางออกจะทำให้ท่อวัดด้านทางออกเคลื่อนที่ล่าช้าไปกว่าตำแหน่งของท่อวัดเมื่อไม่มีของเหลวไหลผ่าน ผลรวมของแรงทั้งที่กระทำต่อทางเข้าและทางออกของท่อวัดจะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาบิด (twisting reaction) กับท่อวัดระหว่างที่มีของเหลวไหลผ่านท่อวัด อธิบายได้จากรูปที่ 19 จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีของเหลวภายในท่อวัดซึ่งถูกกระตุ้นให้มีการสั่นด้วยตัวกำเนิดคลื่นสะเทือน (drive coil) สั่นที่ค่าความถี่ค่าหนึ่งคงที่ จากนั้นเมื่อปล่อยของเหลวไหลเข้าท่อวัด ท่อวัด ณ จุด B จะมีการเคลื่อนที่ขึ้นลงเร็วกว่าของเหลวที่จุด A และ จุด C ดังนั้นของเหลวขณะไหลผ่านส่วนโค้งจะมีการเปลี่ยนความเร็วการไหลทั้งขนาดและทิศทางเมื่อเทียบกับระบบอ้างอิงเดิม ถึงแม้ความเร็วสัมพัทธ์ของเหลวดังกล่าวเมื่อเทียบกับท่อวัดจะมีค่าคง

ที่ ในขณะที่ของเหลวเคลื่อนที่หนีออกจากแนวแกนติดตั้งท่อวัด (mounting axis ; แนว A-C ) การเคลื่อนที่ของท่อวัดจะล่าช้า (lag ) กว่าตำแหน่งท่อวัดจุด B แต่เมื่อของเหลวไหลกลับทิศมุ่งเข้าหาแนวแกนติดตั้งท่อวัด (แนว A-C ) ท่อวัดจะมีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าล้ำหน้าจุด B ไป

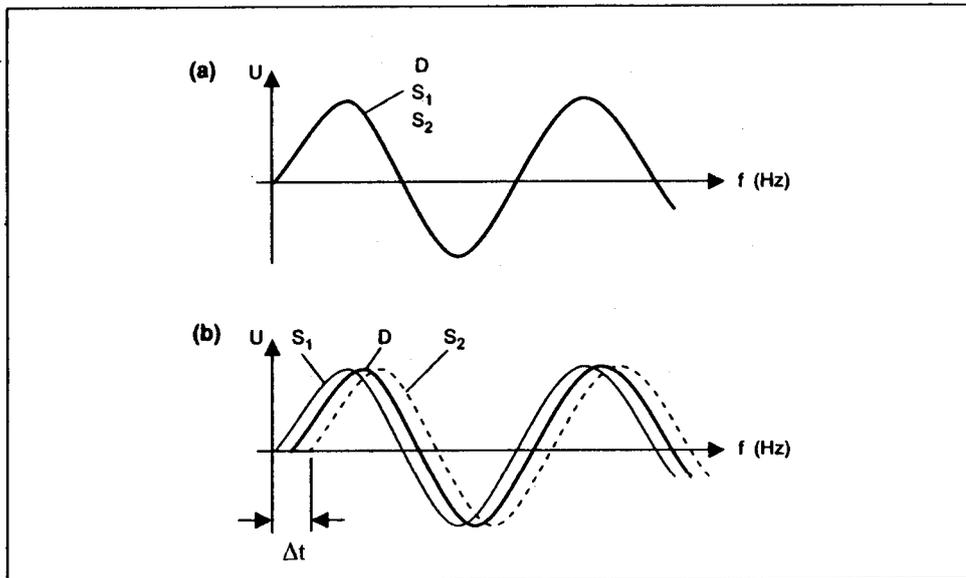


**Coriolis Principle**  
(Courtesy of K-Flow)

**รูปที่ 19** หลักการคอริโอลิส (coiolis principle)

เนื่องจากท่อวัดถูกทำให้สั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของตัวท่อวัดโดยการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โทรแมกเนติก ( eletromagnetic devices) หรือตัวกำเนิดคลื่นสะท้อน (drive coil) ซึ่งที่ความถี่ธรรมชาตินี้จะใช้พลังงานในการสั่นน้อยมาก ถือได้ว่าเป็นข้อดีข้อหนึ่งของมาตรวัดชนิดนี้ ดังนั้นการเคลื่อนที่ทุกๆตำแหน่งของท่อวัดจะแสดงได้ด้วยกราฟไซน์ (a sine wave) (รูปที่ 20(a) และรูปที่ 22) ขณะที่ไม่มีของเหลวไหลผ่านทุกๆจุดบนท่อวัดจะเคลื่อนที่อย่างมีลำดับและเป็นระเบียบ

ตามที่ถูกระตุ้นโดยตัวกำเนิดคลื่นสะเทือน (drive coil) ในรูปที่ 20 (b) และรูปที่ 24 จะเห็นว่าเมื่อมีมวลของเหลวไหลผ่านท่อวัดเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของท่อวัดด้านทางเข้า (กราฟ S1) จะถูกหน่วงให้ช้าลงจากคาบการเคลื่อนที่ซึ่งตัวกำเนิดคลื่นสะเทือน (drive coil) ทำการกระตุ้น (กราฟ D) และการเคลื่อนที่ของท่อวัดด้านทางออก (กราฟ S2) จะมีแรงกระทำให้ล้าหน้าจากคาบการเคลื่อนที่เดิมดังในรูปที่ 20 (b) ระยะเวลาที่ล่าช้า ( $\Delta t$ ) ระหว่างคาบการเคลื่อนที่ของ S1 และ S2 จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลมวลผ่านหน่วยวัด



**Sine Waves, (a) No Flow, (b) Mass Flow**  
(Courtesy of DanFoss)

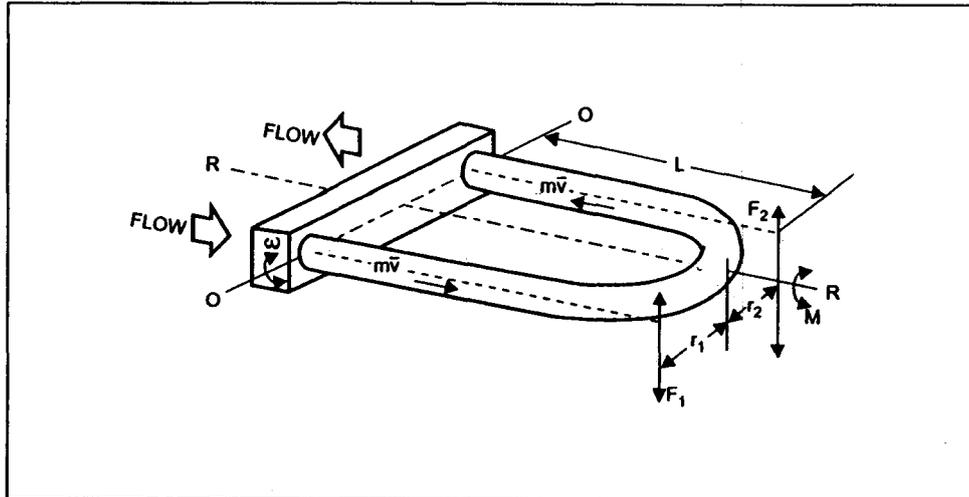
รูปที่ 20 กราฟรูปไซน์ (a) เมื่อไม่มีการไหลผ่านท่อวัด  
(b) เมื่อมีการไหลผ่านท่อวัด

$S_1$  = คาบการสั่นของท่อวัดขาเข้า

$S_2$  = คาบการสั่นของท่อวัดขาออก

D = คาบการสั่นของท่อวัดที่ความถี่ธรรมชาติเนื่องจากถูกระตุ้นด้วยขดลวดกระตุ้น

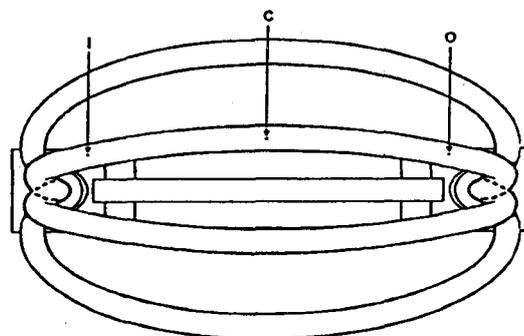
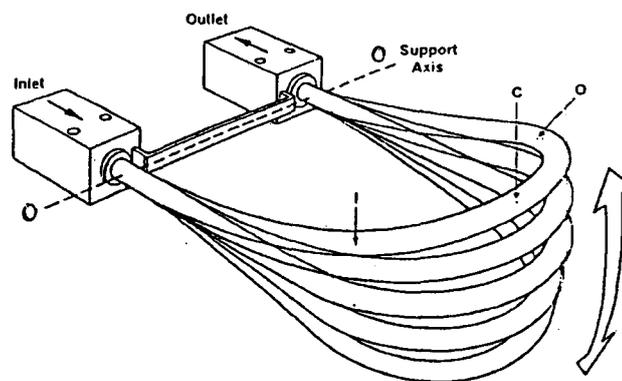
เพื่อเพิ่มความเข้าใจมากขึ้น พิจารณาท่อวัดรูปร่างตัว U ในรูปที่ 21 สมการการเคลื่อนที่พื้นฐานที่กระทำต่อโครงสร้างท่อวัดดังกล่าวสามารถหาได้ ดังในสมการที่ (4) ซึ่งจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลมวล (the mass flow rate) กับพฤติกรรมของท่อวัดภายในหน่วยวัด เมื่อมีท่อวัดรูปร่างตัว U เพียงท่อเดียว แต่สมการดังกล่าวนี้ก็ยังสามารถนำไปใช้กับท่อรูปร่างตัว U 2 ท่อวัดที่มีการสั่นในทิศทางตรงกันข้ามโดยมีเฟสการสั่นต่างกัน 180 องศา (two opposite measuring tubes)



**Oscillating U-Tube**  
(Courtesy of Micro Motion, Inc.)

รูปที่ 21 แสดงผลการสั่นของท่อวัดรูปร่างแบบตัวยู

การทำงานของท่อวัดจะอ้างอิงแกนหลัก 2 แกน คือ แกนรับ (mounting axis หรือ support axis) ได้แก่แกน O-O ซึ่งเป็นแกนอ้างอิงการสั่นของท่อวัด และแกนบิด (twist axis) ได้แก่



NO FLOW

Oscillating Flow Tube, No Flow

รูปที่ 22 ลักษณะการสั่นของท่อวัดรูปร่างตัวยู เมื่อไม่มีของเหลวไหลผ่าน

แกน R-R ซึ่งเป็นแกนอ้างอิงในการบิดของท่อวัด ขณะที่ไม่มีของเหลวท่อวัดสั้นด้วยความถี่ธรรมชาติคงที่ค่าหนึ่งดังรูปที่ 22 และเมื่อของเหลวมีมวล  $m$  ไหลด้วยความเร็ว  $V$  ผ่านท่อวัดรูปร่างตัว  $U$  ซึ่งถูกทำให้สั่น (oscillating) ด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega$  รอบแกนรับหรือแกน 0-0 ของเหลวเมื่อไหลผ่านเข้าสู่ท่อวัดทำให้เกิดความเร็วของเหลวในแนวตั้งฉาก (*vertical velocity*) กับท่อวัดดังในรูปที่ 23 โดยความเร็วนี้จะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากแนวแกนรับด้วยอัตราคงที่หรือด้วยความเร่งคงที่นั่นเอง ในขณะที่ของเหลวเคลื่อนที่ภายในท่อวัดวัดด้วยความเร็วสัมผัสเมื่อเทียบกับท่อวัด (*horizontal velocity*) มีค่าคงที่ การเคลื่อนที่ของเหลวผ่านท่อโค้งที่สั้นและก่อให้เกิดความเร่งคงที่นี้ เรียกว่า “*ความเร่งคอริโอลิส (coriolis acceleration)*” ซึ่งจะมีค่าคงที่ตลอดแนวความยาวท่อวัดดังรูปที่ 23 เนื่องจากกฎนิวตันข้อที่ 2  $F = ma$  เมื่อพบว่าของเหลวมีความเร่งคงที่ดังนั้นแรงกระทำต่อของเหลวจึงขึ้นอยู่กับมวลของเหลวเท่านั้น แต่เพราะเมื่อมีแรงกิริยาย่อมมีแรงปฏิกิริยาจากกฎข้อที่ 3 ของนิวตัน ดังนั้นเมื่อมีแรงที่ท่อวัดกระทำต่อของเหลวเนื่องจากการสั้นของท่อวัดส่งผลให้ของเหลวมีแรงกระทำต่อท่อวัด (*fluid reactive force*) ด้วยขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้าม (ทิศทางตรงข้ามกับ *coriolis acceleration*) ดังรูปที่ 23 แรงอันเนื่องมาจากของเหลวกระทำต่อท่อวัดเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของเหลวผ่านท่อวัดซึ่งถูกกระตุ้นด้วยความถี่คงที่ เรียกว่า “*แรงคอริโอลิส (coriolis force)*” กระทำในทิศทางลงซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\vec{F} = m(2\vec{\omega} \times \vec{v}) \quad (4)$$

หรือ

$$F = 2m\omega\vec{v}$$

เมื่อ

$$F = \text{แรงคอริโอลิส (coriolis force)}$$

$$\omega = \text{ความเร็วเชิงมุม (angular velocity)}$$

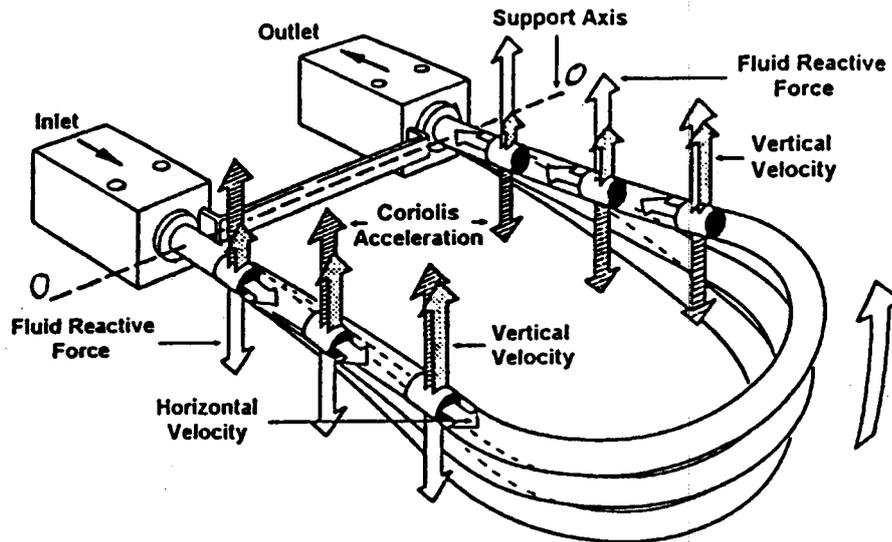
$$\vec{v} = \text{ความเร็วเฉลี่ยการไหลของเหลว}$$

$$m = \text{มวล (mass)}$$

เมื่อ  $F, \omega$  และ  $\vec{v}$  เป็นเวกเตอร์ (vector) ส่วน  $m$  เป็นสเกลลาร์และเป็นมวลที่จะทำการหาค่าเมื่อรู้ตำแหน่งระยะห่างจากแนวแกน 0-0 หรือแกนรับที่แน่นอนมีค่าเท่ากับ  $L$  ซึ่งค่า  $F$  ในสมการที่ (4) มีค่าเท่ากับกฎข้อที่ 2 ของนิวตันคือ

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

เมื่อของเหลวไหลออกจากท่อวัด จะเกิดขบวนการในทางกลับกัน ดังในรูปที่ 23 ของเหลวด้านทางออกจะถูกทำให้ความเร็วในแนวตั้งฉากกับท่อวัดถูกหน่วงด้วยอัตราหน่วงคงที่ซึ่ง



**Flow Tube Response to Coriolis Acceleration**

รูปที่ 23 แสดงผลความเร็วของเหลวภายในท่อวัดขณะมีการไหลผ่านท่อวัด รวมทั้งผลลัพธ์ของแรงปฏิกิริยาของของเหลวกระทำต่อท่อวัดอันเนื่องมาจากความเร่งคอริโอลิส (coriolis acceleration) และความหน่วงคอริโอลิส (coriolis deacceleration)

เรียกว่า “ความหน่วงคอริโอลิส (coriolis deacceleration)” แรงเนื่องจากท่อวัดไปหน่วงให้ของเหลวมีความเร็วในแนวตั้งจากลดลงด้วยอัตราคงที่เนื่องจากการสั่นของท่อวัดส่งผลให้ของเหลวมีแรงปฏิกิริยาจากกฎข้อที่ 3 ของนิวตัน เป็นแรงกระทำต่อท่อวัดด้วยขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงกันข้าม (ทิศทางตรงข้ามกับ coriolis deacceleration) ดังรูปที่ 23 เราเรียกแรงของเหลวกระทำต่อท่อวัดเกิดขึ้นเนื่องจากการไหล เรียกว่า “แรงคอริโอลิส (coriolis force)” กระทำในทิศทางขึ้น แต่เนื่องจากเวกเตอร์ของความเร็วของเหลวด้านทางเข้าท่อและด้านทางออกท่อวัดมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงข้ามกัน หากพิจารณาท่อวัด (measuring tube) ในแนวแกน R-R พบว่าแรงอันเนื่องมาจากของเหลวกระทำบนขาท่อวัดทางด้านเข้าและขาท่อวัดทางด้านออก มีค่าเท่ากับ  $F_1$  และ  $F_2$  ตามลำดับ ดูรูปที่ 21 และรูปที่ 24, 25, 26 ซึ่งมีทิศทางกระทำในทิศทางตรงกันข้าม แต่ขนาดของแรงทั้งสองมีค่าเท่ากัน ก่อให้เกิดการบิดของท่อวัดรอบแกน R-R เท่ากับโมเมนต์ M รอบแกน R-R กระทำต่อท่อวัดด้วยรัศมี r ค่าโมเมนต์มีค่าเท่ากับ

$$\vec{M} = \vec{F}_1 \vec{r}_1 + \vec{F}_2 \vec{r}_2 \quad (5)$$

แต่เนื่องจาก

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_2$$

$$r_1 = r_2$$

ดังนั้นจะได้ว่า แทนค่า F จากสมการ (4)

$$M = 2Fr = 4m\bar{v}\omega r \quad (6)$$

แต่เนื่องจากมวล  $m$  ภายในท่อวัดถูกกำหนดด้วย

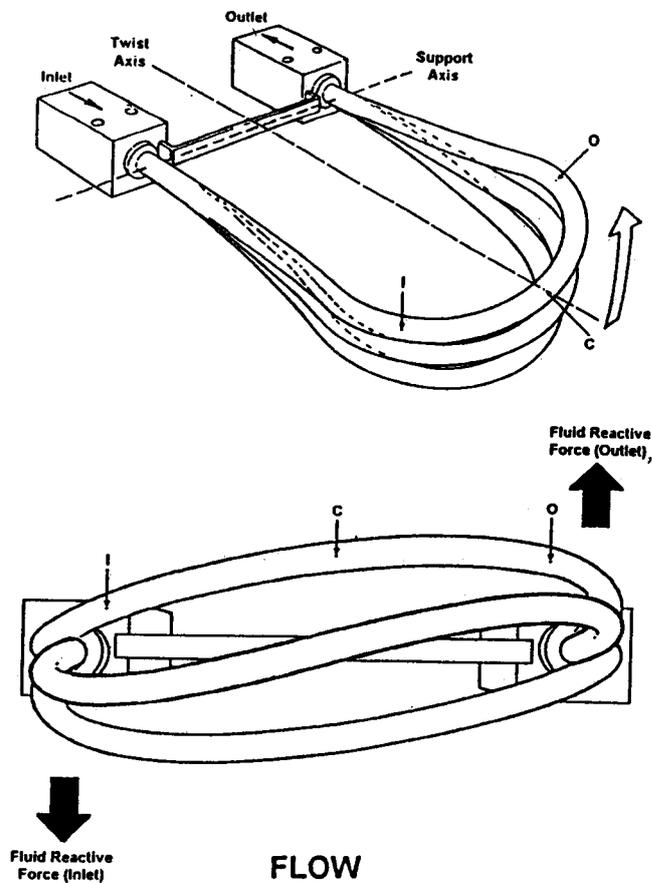
$$m = \rho AL \quad (7)$$

เมื่อ

$\rho$  = ความหนาแน่นของเหลว ;  $\text{kg/m}^3$

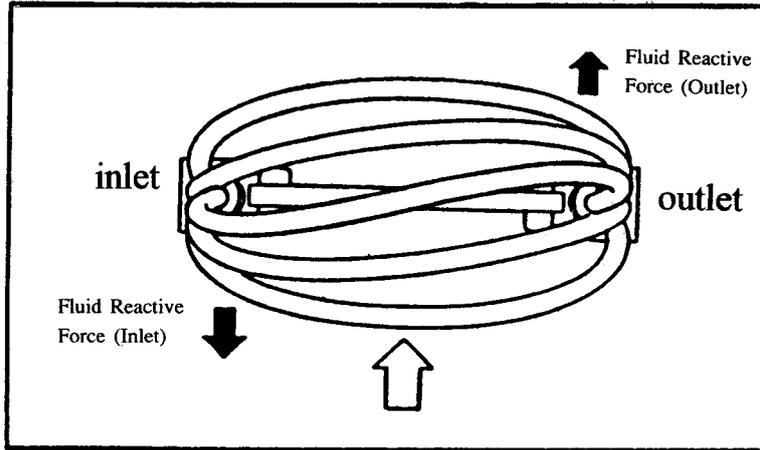
$A$  = พื้นที่หน้าตัดของท่อวัด (cross sectional area) ;  $\text{m}^2$

$L$  = ความยาวท่อวัด ;  $\text{m}$

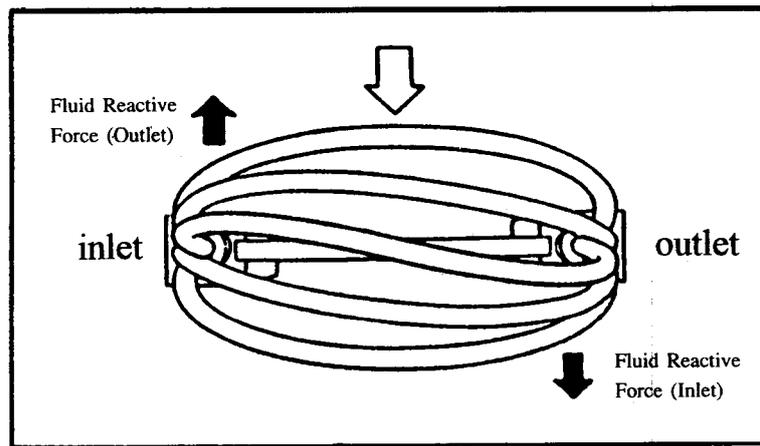


**Oscillating Flow Tube, Response to Flow**

รูปที่ 24 การสั่นของท่อวัดอันเนื่องจากการตอบสนองเมื่อมีของเหลวไหลผ่านท่อวัด



รูปที่ 25 แสดงการบิดตัวของท่อวัดเมื่อสั่นขึ้น



รูปที่ 26 แสดงการบิดตัวของท่อวัดเมื่อสั่นลง

ในขณะที่ความเร็วของเหลวภายในท่อวัดถูกกำหนดด้วยความยาวท่อ  $L$  และเวลาซึ่งใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านท่อวัดด้วยความยาว  $L$  มีค่าเท่ากับ  $t$  ดังนั้น

$$\bar{v} = \frac{L}{t} \quad (8)$$

ส่วนอัตราการไหลมวล (mass flow rate;  $W$ ) สามารถหาค่าได้เมื่อทราบค่ามวล (mass);  $m$  ซึ่งไหล ณ จุดที่กำหนดภายในท่อวัดต่อหน่วยเวลา ดังนั้น

$$W = \frac{m}{t} \quad (9)$$

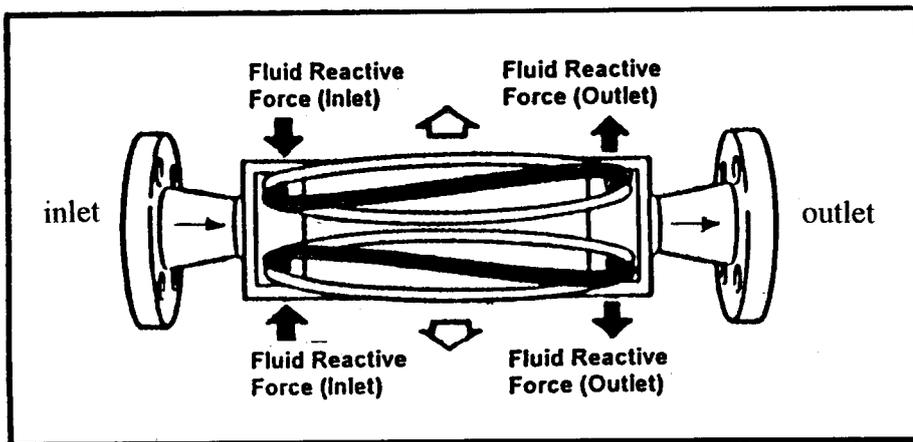
หรือ

$$W = \frac{m\bar{v}}{L} \quad (10)$$

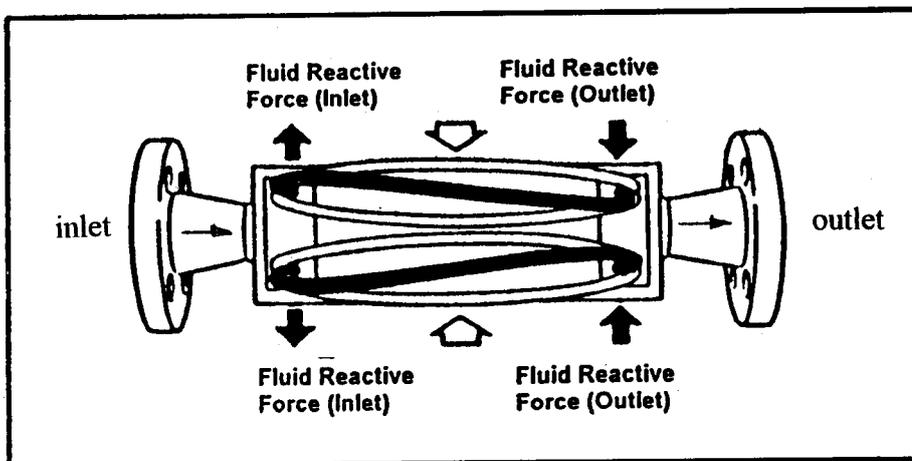
แทนค่าสมการ (10) ลงในสมการ (6) จะได้ว่า

$$M = 4\omega rWL \quad (11)$$

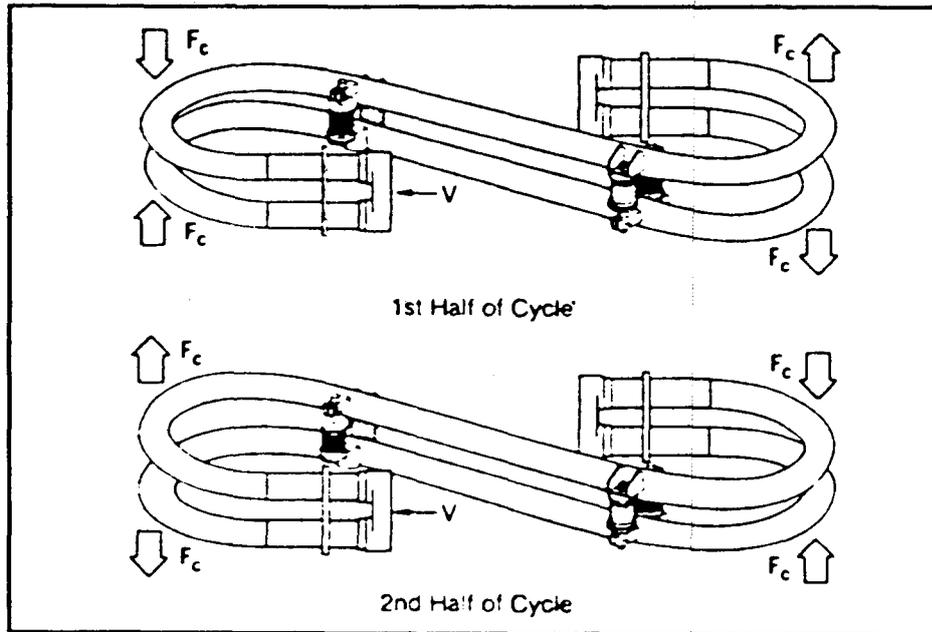
ค่าโมเมนต์ดังกล่าวจะทำให้ท่อวัดมีการบิดตัวเชิงมุมรอบแกน R-R เท่ากับ  $\theta$  องศา การบิดตัวจะมีค่าสูงสุดที่ครึ่งหนึ่งของการเคลื่อนที่ของการสั่นของท่อวัด (half the travel of the vibrating tube) ในสมการข้างบนจะเห็นได้ว่าโมเมนต์หรือการที่ท่อวัดมีการบิดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลมวล ;  $W$  นั่นคือท่อวัดจะมีการบิดตัวมากขึ้นหากของเหลวไหลผ่านท่อวัดสูงมากขึ้นหรืออัตราการไหลมวลสูงขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 27 แสดงการบิดตัวของท่อวัดเมื่อสั่นออกจากกัน ในกรณีที่มาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) มีท่อวัดจำนวน 2 ท่อ

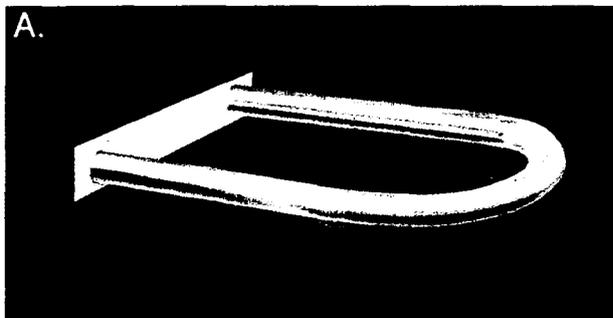


รูปที่ 28 แสดงการบิดตัวของท่อวัดเมื่อสั่นเข้าหากัน ในกรณีที่มาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) มีท่อวัดจำนวน 2 ท่อ

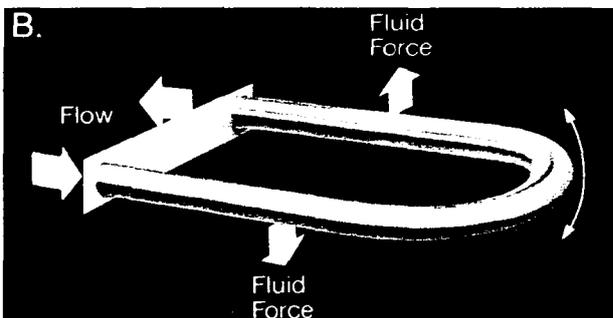


— Tube Deflections Due to Coriolis Forces

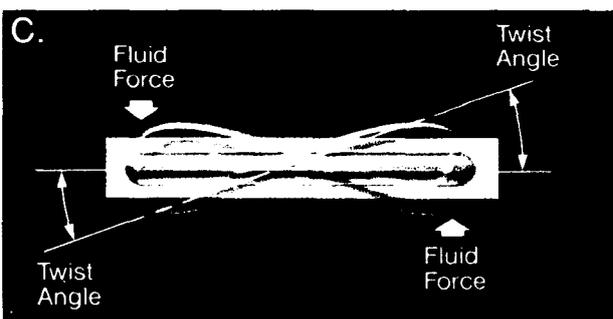
รูปที่ 29 ลักษณะการบิดตัวของท่อวัดอีกรูปแบบหนึ่ง อันเนื่องมาจากมีของเหลวไหลผ่าน



A. Sensor tube vibration.



B. Forces acting on sensor tube in upward motion.



C. End view of a sensor tube indicating force couple and tube twist.

รูปที่ 30 ภาพถ่ายปรากฏการณ์การบิดตัวของท่อวัดอันเนื่องมาจากแรงคอริโอลิส (coriolis force)

เมื่อถึง ณ ที่นี้เราเรียกปรากฏการณ์การบิดตัวของท่อดึงที่มีการสั่นด้วยความถี่สม่ำเสมออันเนื่องจากการไหลของของเหลวไหลผ่านท่อดึงดังกล่าวว่า “ปรากฏการณ์คอริโอลิส (coriolis effect)”

ถึงกระนั้นก็ตามพบว่าการบิดตัวของท่อดึงอันเนื่องจากโมเมนต์ก็จะถูกต้านหรือฝืนในการบิดตัวด้วยแรง  $K$  ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของตัวท่อดึง เราสามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ด้วยการพิจารณาการบิดตัวในกรณีของสปริง เมื่อสปริงอยู่ภายใต้โมเมนต์บิด (twisting moment) จะมีค่าทอร์ก (Torque)  $T$  เท่ากับ

$$T = K\theta \quad (12)$$

แต่เพราะ  $T = M$  ดังนั้นอัตราการไหลมวล (mass flow rate)  $W$  จะมีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับการบิดตัวเชิงมุมรอบแกน R-R เท่ากับ  $\theta$  องศา

$$K\theta = 4\omega rWL \quad (13)$$

$$W = \frac{K\theta}{4\omega rL} \quad (14)$$

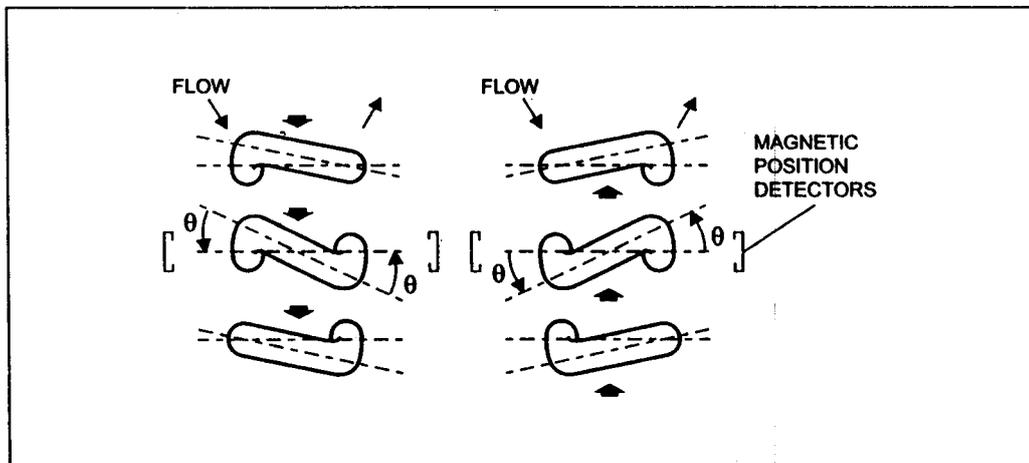
ในการหาค่าอัตราการไหลมวล จึงจำเป็นต้องทำการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ภายในสมการข้างบนนี้

1. ค่า  $K$  เป็นค่าของแรง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำท่อดึงซึ่งจะมีค่าคงที่และแปรผันเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิ
2. ค่า  $\theta$  เป็นค่ามุมการบิดตัวของท่อดึงซึ่งหาระยะมุมการบิดตัวได้ด้วยตัวตรวจจับตำแหน่ง (magnetic position sensors) จำนวน 2 ตัว
3. ค่า  $\omega$  เป็นค่าความเร็วเชิงมุมที่ทราบจากบริษัทผู้ผลิตเนื่องจากท่อดึงถูกกระตุ้นโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (eletromagnetic devices) หรือตัวกำเนิดคลื่นสะเทือน (drive coil) ให้ส่วนที่ความเร็วเชิงมุมค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของท่อดึง
4. ค่า  $r$  และค่า  $L$  เป็นค่าคงที่ที่สามารถทราบค่าจากบริษัทผู้ผลิต

ในการตรวจจับการบิดตัวของท่อดึงว่ามีระยะมุมการบิดตัวเท่าไรนั้นด้วยการประมวลผลจากการใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง (magnetic position sensors) จำนวน 2 ตัวต่อท่อดึง

แต่ละตัวตรวจจับตำแหน่งจะทำการวัด  $\theta$  เป็นฟังก์ชันของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแต่ละขาของท่อวัดผ่านแนวกึ่งกลางของการเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ทั้งหมดหรือระนาบของท่อวัดดังในรูปที่ 31 เมื่อไม่มีของเหลวไหลเข้าท่อวัด ความแตกต่างของมุมการบิดตัวท่อวัดเมื่อเวลาผ่านไประหว่างขาทั้งสองของท่อวัดซึ่งตัวตรวจจับตำแหน่งวัดได้แต่ละจุดมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อมีของเหลวไหลภายในท่อวัดจะก่อให้เกิดแรงกระทำต่อท่อวัดในทิศทางที่ตรงข้ามส่งผลให้เกิดโมเมนต์กระทำต่อตัวท่อให้บิดไปเป็นมุม  $\theta$  และจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของอัตราการไหลของมวลโดยการเคลื่อนที่ของขาท่อวัดทั้ง 2 ขาไปยังตำแหน่งเดียวกันนั้นจะเกิดขึ้นที่ระยะเวลาแตกต่างกันส่งผลให้เกิดความแตกต่างของเวลาระหว่างขาทั้ง 2 ของท่อวัดที่ตัวตรวจจับตำแหน่งวัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลงด้วยขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของขาท่อวัด

โดยความแตกต่างของเวลา (time differentials) จะถูกแปลงค่าเป็นจำนวนพัลส์ของแต่ละความยาวที่แตกต่างกัน (pulses of different lengths) ด้วยวงจรดิจิทัล (digital logic circuit)



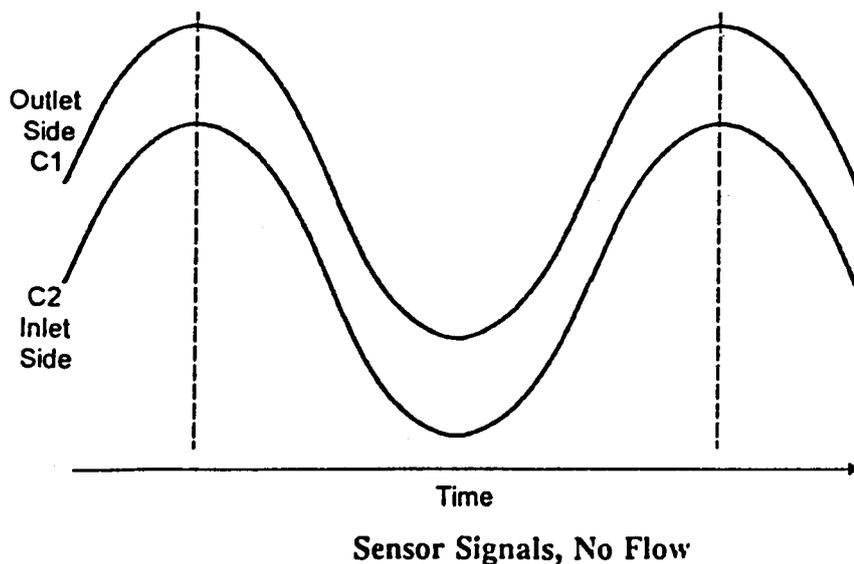
**Deflection Angle Measurement**  
(Courtesy of Micro Motion, Inc.)

รูปที่ 31 การวัดมุมการบิดตัว

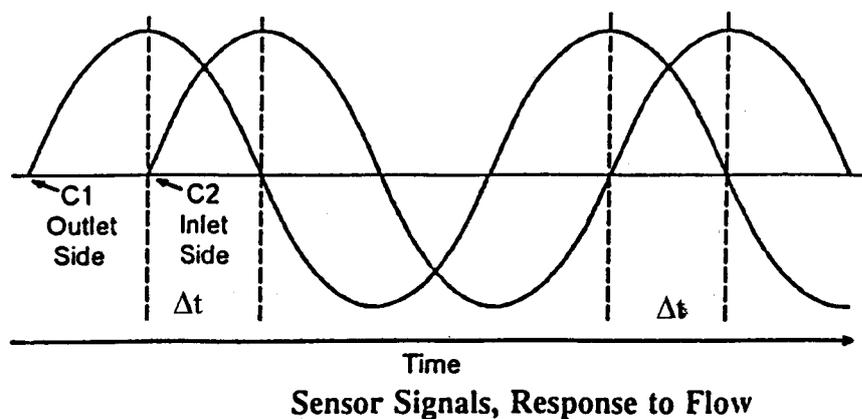
เมื่อทำการพิจารณาโดยใช้หลักทางเรขาคณิตเพื่อหาค่า  $\theta$  เราให้  $v_t$  เป็นความเร็วของการเคลื่อนที่ของท่อวัด  $r$  ตำแหน่งกึ่งกลางของการสั้นเคลื่อนที่หรือ  $r$  ตำแหน่งระนาบของท่อวัด หรือรอบแกนหมุน R-R คูณด้วยช่วงระยะเวลาที่ขาท่อใช้สำหรับเคลื่อนที่  $\Delta t$  จากจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดหารด้วยระยะระหว่างขาท่อวัดทั้งสอง ดังนั้น

$$\sin \theta = \frac{v_t \Delta t}{2r}$$

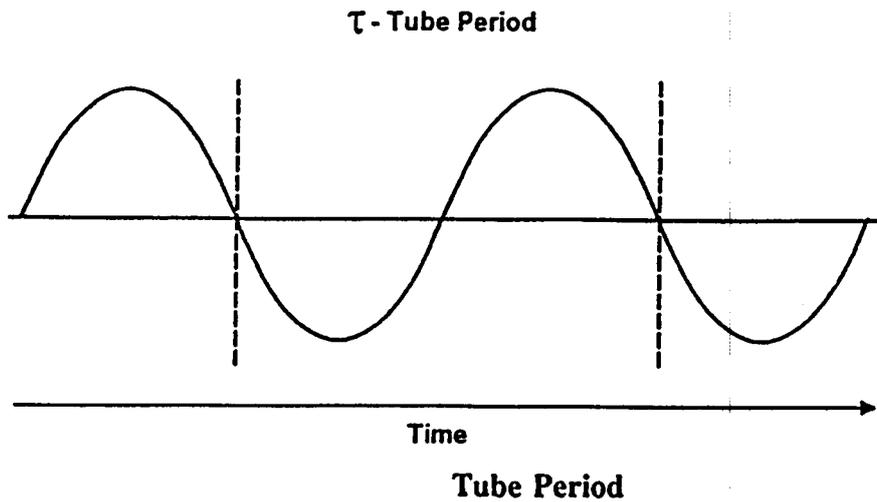
หรือหากพิจารณาจากความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของท่อวัดทางด้านขาเข้ากับทางด้านขาออกเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนไปจากการทำงานของตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นภายใน coil เทียบกับคาบเวลาเมื่อมีการไหลของเหลวไหลผ่านท่อ มองผ่าน oscilloscope เป็นดังรูปที่ 32 และ 33 จะเห็นได้ว่าที่สภาวะของเหลวไหลผ่านท่อ กราฟของท่อวัดขาเข้าจะเคลื่อนที่ช้ากว่ากราฟของท่อวัดขาออกอยู่เป็นช่วงเวลา  $\Delta t$  โดยทำการวัดความแตกต่างของเวลา ณ ตำแหน่งจุดสูงสุดยอดของเส้นกราฟและควรทำการวัดอย่างน้อย 2 จุด เพื่อให้ได้ค่า  $\Delta t$  ถูกต้อง



รูปที่ 32 สัญญาณซึ่งตรวจจับได้จากตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ของการปิดตัวของท่อวัดเมื่อสภาวะไม่มีการไหล  
 C1 บริเวณขาท่อวัดด้านทางออก  
 C2 บริเวณขาท่อวัดด้านทางเข้า



รูปที่ 33 สัญญาณซึ่งตรวจจับได้จากตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ของการปิดตัวของท่อวัดเมื่อสภาวะมีการไหล



**รูปที่ 34** การหาคาบการสั่นของท่อวัด

ซึ่งหากค่า  $\theta$  มีค่าน้อยๆ ค่า  $\sin \theta \cong \theta$  และนั่นหมายถึงท่อวัดมีการเคลื่อนที่ในเชิงมุมน้อยมากจนสามารถถือได้ว่า

$$v_t = \omega L \quad (16)$$

เมื่อ

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุม

$L$  = ความยาวของท่อวัด

ดังนั้นสมการที่ (15) เป็น

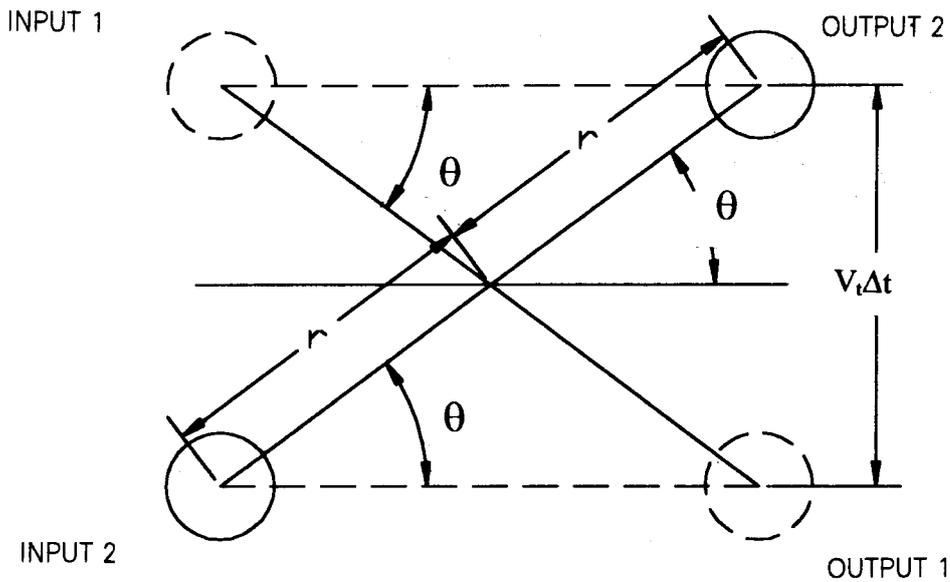
$$\theta = \frac{\omega L \Delta t}{2r} \quad (17)$$

จากสมการที่ (14) แทนค่าสมการที่ (17) จะได้

$$W = \frac{K \omega L \Delta t}{8r^2 \omega L} = K \Delta t \quad (18)$$

จากสมการข้างบนนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลมวล (the mass flow rate) ที่จุดใดๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงเฉพาะกับช่วงระยะเวลา  $\Delta t$  หรือช่วงระยะเวลาที่แตกต่างกันของท่อวัดที่จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเดียวกัน ในขณะที่ท่อวัดมีของเหลวไหลผ่านท่อเทียบกับขณะที่ท่อวัดไม่มี

ของเหลวไหลผ่าน และค่าคงที่ทางเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำท่อวัดเท่านั้น จากสมการจะเห็นได้ว่า  $W$  จะไม่ขึ้นกับความถี่ของการสั่นของท่อวัด  $\omega$  แต่อย่างใด



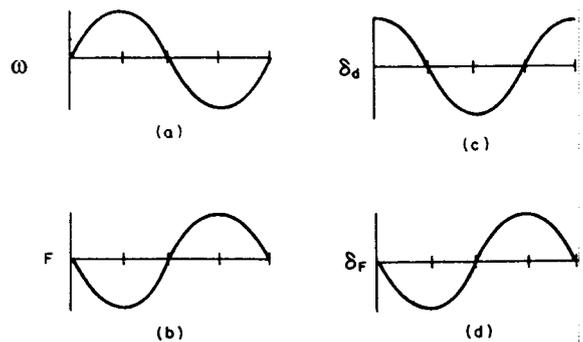
สำหรับค่าของแรง  $K$  ซึ่งต้านทานต่อการบิดตัวของท่อวัดนั้น จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำท่อวัดซึ่งมีค่าคงที่แต่จะแปรผันเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ แต่เนื่องจากค่าของแรง  $K$  เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยสัดส่วนคงที่เมื่อเทียบกับค่า modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำท่อวัด ดังนั้นในระหว่างที่ทำการวัดอัตราการไหลมวลจึงจำเป็นต้องทำการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิติดอยู่กับท่อวัด เช่น platinum RTD เมื่ออุณหภูมิของท่อวัดมีการเปลี่ยนแปลงเครื่องวัดอุณหภูมิจะส่งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ไปยังหน่วยประมวลผลเพื่อทำการปรับค่าของแรง  $K$  ให้ถูกต้อง เพื่อให้ผลคูณค่าของแรง  $K$  และค่าช่วงระยะเวลา  $\Delta t$  ให้ค่าอัตราการไหลมวลที่ถูกต้องแม่นยำ

ในทางปฏิบัติมาตรวัดมวลอาจจะประกอบด้วยท่อวัดจำนวน 2 ท่อซึ่งอาจนำมาต่อเป็นแบบขนานหรือแบบอนุกรมโดยให้มีการสั่นในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อที่จะช่วยลดปัญหาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับท่อ อีกทั้งยังทำให้เกิดสมดุลย์ของแรงและโมเมนต์ที่จุดต่อเชื่อมระหว่างท่อวัดกับตัวแยกการไหล (flow splitter) ในขณะที่เดียวกันจำเป็นต้องทำการควบคุมไม่ให้ท่อวัดมีการบิดตัวสูงเกินกว่าจุดยืดหยุ่นตัว (elastic point) ของวัสดุที่ใช้ทำท่อวัดอีกด้วย

ค่าการบิดตัวของท่อวัด  $\theta$  อันเนื่องจากการปรากฏการณ์คอริโอลิส (Coriolis effect) เมื่อมีมวลของเหลวไหลผ่านท่อวัดซึ่งถูกทำให้ท่อสั่นด้วยความถี่ค่าคงที่นั้นมีค่าน้อยมาก

ประมาณ 0.04 นิ้ว (1 มิลลิเมตร) หรืออาจบิดตัวสูงสุด 0.0014 นิ้ว ( 0.035 มิลลิเมตร) ที่อัตราการไหลสูงสุดที่มาตรวัดมวลสามารถวัดได้ แต่ทั้งนี้และทั้งนั้นขึ้นอยู่กับข้อมูลที่แท้จริงของบริษัทผู้ผลิต

เนื่องจากมาตรวัดมวลคอริออริสเป็นระบบไดนามิกส์อันเนื่องจากการถูกทำให้ท่อวัดสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของท่อวัดเองโดยตัวกำเนิดสั่นสะเทือน (Drive coil) ก่อให้เกิดความเร็วเชิงมุมซึ่งมีค่าบดเดียวกับความเร่งคอริออริส (coriolis acceleration) แต่มีเฟสต่างกับแรงคอริออริส (coriolis force) ของของเหลวกระทำกับท่ออยู่ 180 องศา ดังรูป a) และ b)

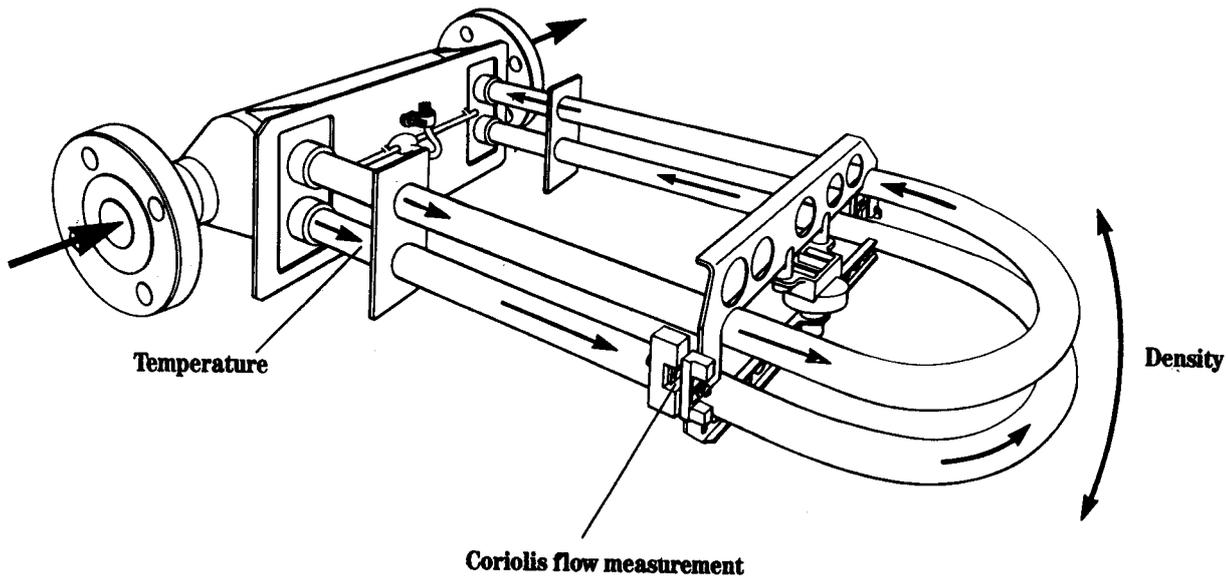


Coriolis frequency and displacement relationships. (a) Angular frequency. (b) Force. (c) Drive displacement mode (d) Force displacement mode.

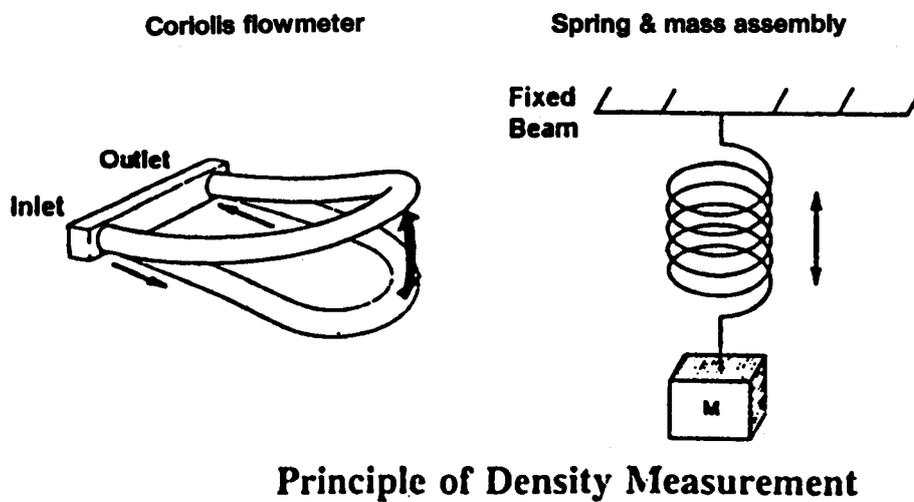
ในขณะเดียวกันระยะการเคลื่อนที่ของท่อวัดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวกำเนิดสั่นสะเทือน ( $\delta_d$ ) ที่ความถี่ของการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติเมื่อผ่านจุดเท่ากับศูนย์ ระยะการเคลื่อนที่ของท่อวัดอันเนื่องมาจากแรงคอริออริส ( $\delta_F$ ) จะมีค่าการเคลื่อนที่มากที่สุด ดังรูป c) และ d)

### การหาค่าความหนาแน่นของเหลวภายในท่อวัด (density measurement system)

เพราะการวัดอัตราการไหลของมวลไม่ได้รับผลกระทบจากความถี่ของการสั่นของท่อวัด ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำให้ท่อวัดสั่นที่ความถี่ธรรมชาติของท่อวัด (natural frequency) แต่การทำให้ท่อวัดมีการสั่นที่ความถี่ธรรมชาติของท่อวัด (natural frequency) มีข้อดี 2 ประการด้วยกัน ประการแรก การที่ทำให้ท่อวัดสั่นที่ความถี่ธรรมชาติทำให้เป็นการประหยัดพลังงานที่ตัวขับ (drive coil) ใช้ในการทำให้ท่อวัดสั่นด้วยความถี่คงที่ ประการที่สอง เนื่องจากความถี่ธรรมชาติของท่อวัดขึ้นอยู่กับมวลของวัสดุซึ่งบรรจุอยู่ภายในท่อวัด ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะทำการวัดความหนาแน่นของของเหลวที่ต้องการวัดอัตราการไหลมวลขณะนั้นควบคู่กันไป ด้วยตัวตรวจ



รูปที่ 35 การทำงานของหน่วยวัดเพื่อหาความหนาแน่นของเหลวที่ไหลผ่านท่อวัด



### Principle of Density Measurement

รูปที่ 36 เปรียบเทียบการใช้หลักการงานของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ในการหาค่าความหนาแน่นของเหลว

จับการเคลื่อนที่ตัวเดียวกันกับที่ใช้ในการหาค่าอัตราการไหลมวล สมการต่อไปนี้อาจใช้หาค่าความหนาแน่นของเหลวภายในท่อวัดโดยใช้ตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ (motion sensors) ตัวเดียวกับตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ซึ่งใช้ทำการตรวจจับการเคลื่อนที่ของท่อวัดเพื่อหาอัตราการไหลของมวลของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) หลักการทำงานของตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ (motion sensors) เพื่อหาความหนาแน่นของเหลวมีหลักการงานเหมือนกับระบบการสั่นสะเทือนของมวลซึ่งผูกติดอยู่กับสปริง (a vibrating spring mass system) ดูรูปที่ 36 พบว่าเมื่อเราดึงมวลดังกล่าวลงแล้วปล่อยให้มวลเคลื่อนที่ขึ้นลง โดยการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะถูก

ผลึกและหนองจำกัดระยะการยึดด้วยสปริง การเคลื่อนที่ที่ครอบรอบในแต่ละรอบการสั่น จะมีความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับสมการ (20) ค่าความถี่ดังกล่าวนี้เรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ดังนั้นทราบได้ที่มวลผูกอยู่กับปลายสปริงมีค่าคงที่ และดึงมวลลงมาแล้วปล่อย ระบบสปริงและมวลดังกล่าวก็จะมี การเคลื่อนที่ขึ้นลงด้วยความถี่คงที่ค่าหนึ่งเสมอ จนกว่าระบบถูกหน่วงให้เคลื่อนที่ขึ้นลงช้าลง ความถี่ธรรมชาติของการเคลื่อนที่ขึ้นลงมีค่าเท่ากับ

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (19)$$

หรือ

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (20)$$

เมื่อ

$\omega$  = ความถี่เชิงมุมของการสั่นของมวล (angular frequency of oscillation)

$f$  = ความถี่ของการสั่นของมวล (frequency of oscillation)

$k$  = ค่าคงที่ของสปริง (spring constant)

$m$  = มวล (mass)

#### หมายเหตุ

1. ถ้ามวลเพิ่มขึ้น ความถี่ธรรมชาติจะลดลง
2. ถ้ามวลลดลง ความถี่ธรรมชาติจะเพิ่มขึ้น

เมื่อเราใช้หลักการพื้นฐานของระบบมวลและสปริงเป็นตัวเทียบเคียงกับการทำงานของท่อวัด ดังนั้นเมื่อให้มวลของระบบมาตรวจวัดประกอบด้วยมวลของโครงสร้างที่มีการสั่น (ท่อวัด) รวมกับมวลของเหลวซึ่งอยู่ในท่อวัดดังกล่าว มีค่าเท่ากับ

$$m = m_{\text{tube}} + m_{\text{liquid}} \quad (21)$$

เนื่องจากมวลของเหลวมีค่าเท่ากับความหนาแน่นคูณด้วยปริมาตรภายในท่อวัด,  $V$

$$m_{\text{liquid}} = \rho V \quad (22)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (19)

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_{\text{tube}} + \rho V}} \quad (23)$$

จากความสัมพันธ์คาบและความถี่

$$T = \frac{1}{f} \quad (24)$$

และ

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (25)$$

เพราะฉะนั้นค่าความหนาแน่นของเหลวจึงมีค่าเท่ากับ

$$\rho = \frac{kT^2}{(2\pi)^2 - m_{\text{tube}}} \quad (26)$$

หรือ

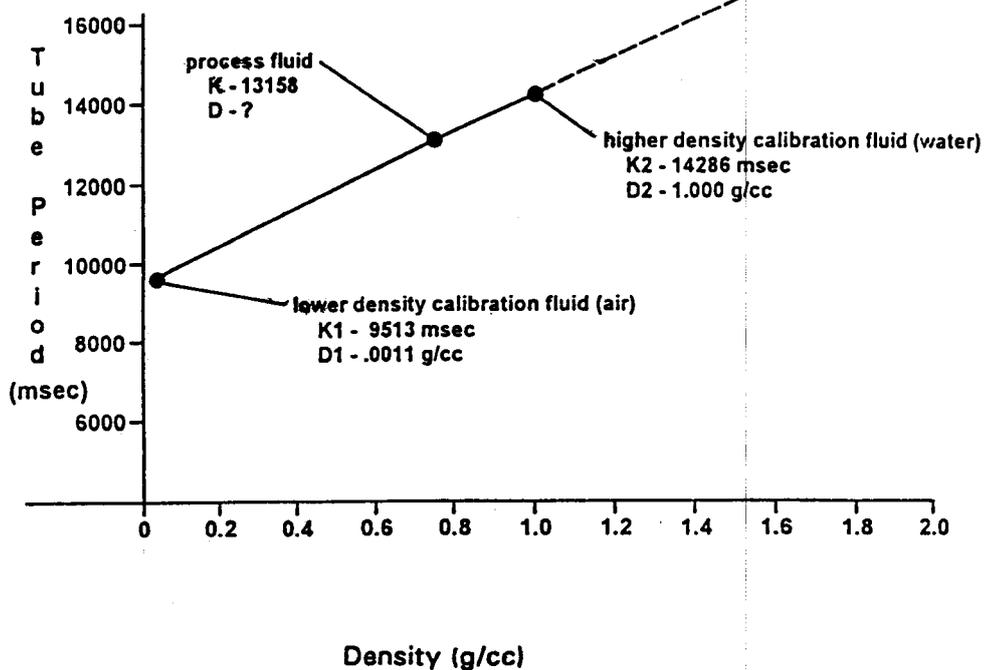
$$\rho = \frac{k}{4\pi^2 Vf^2} - \frac{m_{\text{tube}}}{V} \quad (27)$$

แต่เนื่องจากตัวกำเนิดคลื่นสะเทือน (Drive coil) จะทำหน้าที่บังคับให้ท่อวัดสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติคงที่ตลอดเวลาด้วยระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ย้อนกลับ (feedback control) ดังนั้นค่า  $\omega$  จะมีค่าคงที่ ส่งผลให้คาบของการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ ;  $T$  คงที่ จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริง ;  $k$  ของท่อวัดเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่เดียวกันปริมาตรภายในท่อวัดและมวลของท่อวัดมีค่าคงที่ ดังนั้นเราก็จะสามารถหาค่าความหนาแน่นของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดมวลขณะทำการวัดอัตราการไหลของมวลได้จากสมการข้างบน

### **หมายเหตุ** ความหนาแน่นของเหลวเป็นส่วนผกผันกับความถี่ของการสั่นยกกำลังสอง

แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติ การจับเวลาเพื่อหาคาบการสั่นของท่อวัดจะง่ายกว่าการหาความถี่ของการสั่นของท่อวัด ซึ่งคาบการสั่นจะมีค่าเป็นไมโครวินาที

สำหรับบริษัทผู้ผลิตบางรายได้ทำการสอบเทียบความหนาแน่น (density calibration) จากการทำงานของตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ภายในห้องปฏิบัติการเอง โดยตรวจจับเวลาคาบของการสั่นที่ท่อวัดซึ่งมีอากาศบรรจุอยู่ภายใน หรืออาจจะเป็นของเหลวซึ่งรู้ค่าความหนาแน่นแน่นอนที่มีค่าน้อยๆ เทียบกับคาบการสั่นของท่อวัดเมื่อบรรจุน้ำบริสุทธิ์ (ซึ่งมีค่าความหนาแน่นสูงกว่า) อยู่ภายในท่อวัด ให้มีคาบของการสั่น  $T_1$  และ  $T_2$  ตามลำดับ และให้ความหนาแน่นของอากาศและน้ำบริสุทธิ์ มีค่าเท่ากับ  $D_1$  หรือ  $D_2$  ตามลำดับ ในการสอบเทียบความหนาแน่นของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (g/cc) กับคาบการสั่นของท่อวัด (ms) จากสมการที่ (26) ได้เป็นเส้นตรงดังในรูปที่ 37 ดังนั้นเมื่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (g/cc) กับคาบการสั่นของท่อวัด (ms) มีอย่างชัดเจนเช่นนี้แล้วเมื่อทราบค่าคาบการสั่นของท่อวัดใดๆก็สามารถหาค่าความหนาแน่นของเหลวภายในท่อวัดได้โดยเขียนจุดบนเส้นกราฟระหว่าง 2 จุดที่ทราบค่าแล้ว แต่ต้องระมัดระวังด้วยการสอบเทียบความหนาแน่นควรเลือกของเหลวตัวอย่างทั้ง 2 ให้มีช่วงความหนาแน่นครอบคลุมความหนาแน่นที่ต้องการวัดด้วย



Determining Process Density on the Basis of Reference Densities

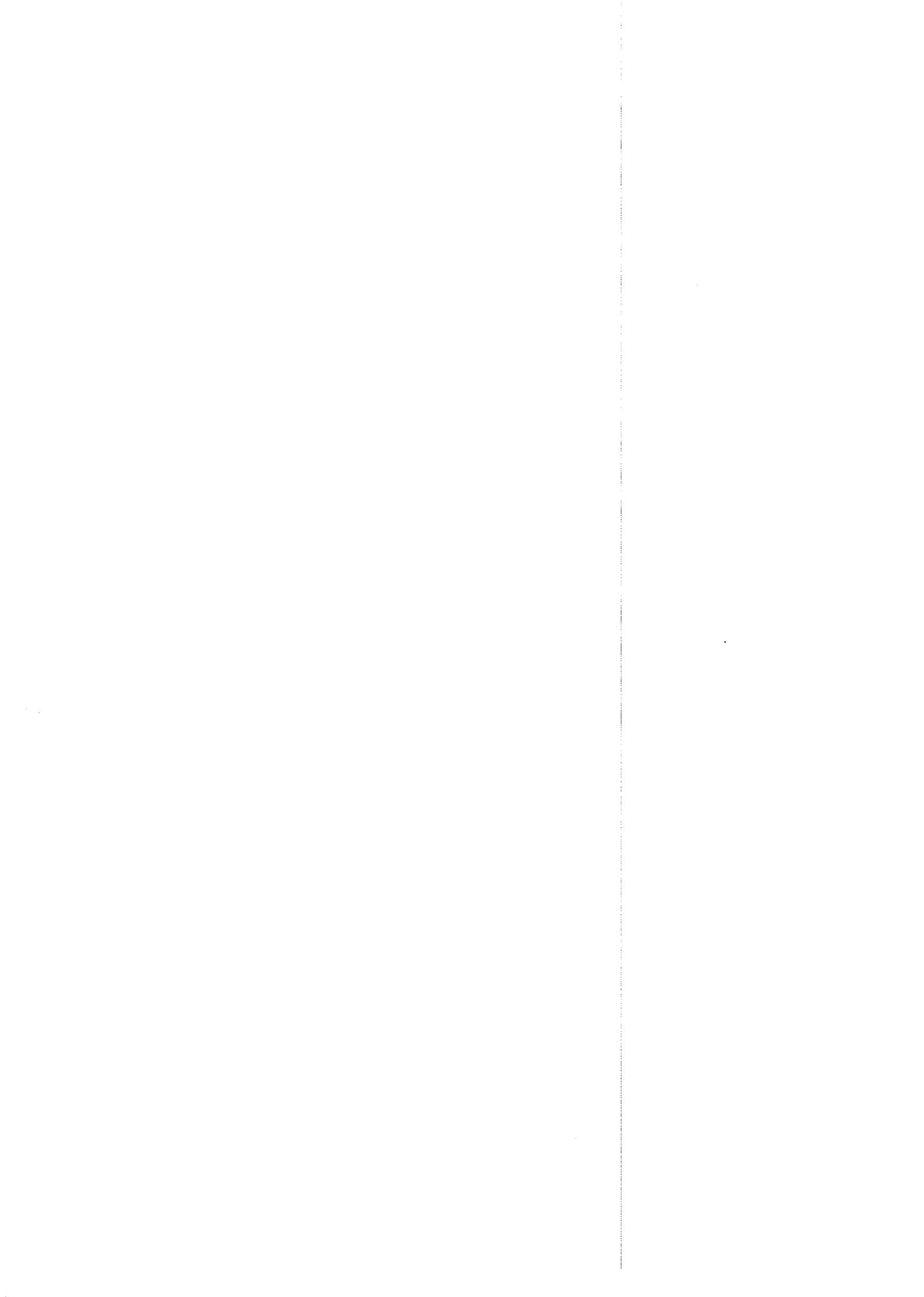
รูปที่ 37 การหาค่าความหนาแน่นของเหลวจากการเปรียบเทียบกับของเหลวซึ่งทราบค่าแน่นอนแล้ว โดยใช้กราฟ

ดังนั้นอุปกรณ์ถ่ายถอดสัญญาณ (electric transmitter หรือ *Remot Flow Transmitter (RFT)* ) จะถูกใช้ให้ทำงานร่วมระหว่างตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ และถูกโปรแกรม กำหนดให้คำนวณการสอบเทียบหาความหนาแน่น (calibration densities)  $D_1$  และ  $D_2$  รวมทั้งหาคาบการสั่น  $T_1$  และ  $T_2$  เมื่อใช้มาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ทำงาน อุปกรณ์ถ่ายถอดสัญญาณ (electric transmitter หรือ *Remot Flow Transmitter (RFT)* ) ตรวจจับคาบการสั่นของท่อวัดและทำการคำนวณความหนาแน่นจริงๆของเหลวที่ต้องการวัดด้วยสมการ

$$D_{\text{process}} = (D_2 - D_1) \frac{(T_{\text{process}}^2 - T_1^2)}{(T_2^2 - T_1^2)} + D_1 \quad (28)$$

ยกตัวอย่าง เมื่อมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) สั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ 76 Hz หรือคาบการสั่น 13,158 msec เมื่อทำการวัดของเหลว ก็จะทราบค่าความหนาแน่นได้จากกราฟในรูปที่ 37 หรืออาจได้จากการแก้สมการด้วยสมการ (28) ก็จะได้ความหนาแน่นของเหลวจริง (actual density of the process fluid)

สิ่งที่ต้องระมัดระวังในการสอบเทียบความหนาแน่น พบว่าค่าคาบการสั่น  $T_1$  และ  $T_2$  ซึ่งได้จากการสอบเทียบความหนาแน่นเป็นค่าคุณสมบัติประจำมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) นั้นๆ เท่านั้น และไม่สามารถแลกเปลี่ยนค่ากันได้แม้แต่มมาตรวัดจะใช้ตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ตัวเดียวกัน รุ่นเดียวกันก็ตาม



# บทที่ 3

## หลักการออกแบบพื้นฐานและ การเลือกมาตรวัดมวลคอริออลิส (Basic Concepts of Designing and Selecting)

### การออกแบบมาตรวัดมวลคอริออลิส (coriolis mass flowmeter)

โดยทั่วไปแล้ว “แรงคอริออลิส (coriolis force)” มีผลต่อระบบท่อซึ่งถูกกระตุ้นให้มีการสั่นนั้นน้อยมาก ดังนั้นหากทำการวัดอัตราการไหลมวลของมาตรวัดมวลเต็มพิกัดโดยทั่วไป ท่อวัดจะมีการบิดตัวประมาณ 1 ต่อ 1000 นิ้ว หรือ 0.001 นิ้ว (0.025 มิลลิเมตร) ซึ่งมีค่าน้อยมาก หรือในกรณีที่มาตรวัดมีช่วงการวัดค่าได้ 100:1 จำเป็นต้องให้มีการบิดตัวอย่างน้อยที่สุดประมาณ 0.000001 นิ้ว (0.25 ไมโครเมตร) เพื่อให้ผลการวัดมีความถูกต้องเชื่อถือได้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือสูงภายในสภาวะสิ่งแวดล้อมการใช้งานในวงอุตสาหกรรม การออกแบบหน่วยวัด (sensors) ต่างๆ ได้รับการออกแบบและพัฒนา และทดสอบการใช้งานในสภาวะต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นของเหลว , อุณหภูมิของเหลวและอุณหภูมิสถานะแวดล้อม , แรงสั่นสะเทือนทั้งจากตัวมาตรวัดมวลเองและจากภายนอก ตลอดจนปัจจัยอื่นๆ ด้วยเหตุนี้การพัฒนาหน่วยวัด (sensors) ให้ดียิ่งขึ้น ยิ่งส่งผลให้มาตรวัดชนิดนี้มีความน่าเชื่อถือและให้ผลการวัดอัตราการไหลมวลถูกต้องแม่นยำสูงยิ่งขึ้นต่อไป

ในการพัฒนาการออกแบบเบื้องต้นที่ต้องคำนึง ได้แก่การประยุกต์การใช้งานมาตรวัดมวลกับของเหลวต่างชนิดกัน , การทำงานภายใต้ความดันค่าต่างๆ , ช่วงการวัดอัตราการไหล , ความดันตกคร่อมตัวมาตรวัดมวล , การขยายสัญญาณ (signal amplitude) และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณเสียง (signal-to-noise) แต่ในการพัฒนาก็เจอปัญหาเนื่องจากปัจจัยต่างๆ มีผลขึ้นตรงต่อกันทั้งในทางตรงและทางอ้อม เป็นต้นว่าวัสดุที่ใช้ทำท่อวัด (tube material) รูปร่างของท่อวัด (shape) และความหนาของผนังท่อวัด ต่างก็เป็นปัจจัยหลักในการก่อให้เกิดและผลิตรูปแบบสัญญาณ นั่นคือวัสดุที่เลือกใช้ทำท่อวัดเมื่อต่างชนิดกัน ก็ส่งผลให้มีค่า spring constant แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ท่อวัดที่มีความยาวมากกว่าและเมื่อถูกัดรูปทรงท่อโค้งในรูปแบบหนึ่งแล้วพบว่าจะมีการบิดตัวของท่อวัดได้มากกว่าท่อวัดที่สั้นและตรง ในส่วนผนังท่อที่หนากว่าจะ

สูญเสียรูปทรงเนื่องจาก coriolis force น้อยกว่าท่อวัดผนังบาง เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันชนิดวัสดุ ,ขนาดท่อวัด และผนังท่อวัด จะมีผลต่อความดันใช้งาน ส่วนขนาดท่อวัด (tube diameter) ความยาวท่อวัด , และรัศมีการโค้งงอท่อวัดต่างก็เป็นปัจจัยหลักต่อความดันตกคร่อม (pressure drop) ตัวมาตรวัด เป็นต้น

เมื่อการออกแบบมาตรวัดมวลพื้นฐานประสบผลแล้ว ในขั้นต่อไปจำเป็นต้องทำการออกแบบให้สัญญาณคอริโอลิส (coriolis signal) ซึ่งมีค่าน้อยมากอยู่แล้วนั้นไม่ให้ถูกรบกวนหรือรบกวนจากสิ่งแวดล้อมขณะใช้งาน ซึ่งนับเป็นขั้นตอนการออกแบบที่สำคัญมาก โดยการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบมาตรวัดวิเคราะห์หาความเครียดและความเค้น (finite element analysis) เพื่อป้องกันสภาวะการทำงานที่ไม่ต้องการภายใต้สภาวะการทำงานจริง อีกทั้งช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถออกแบบรูปร่างลักษณะของท่อวัดรวมทั้งส่วนประกอบอื่นๆไปจัดวางไว้ในตำแหน่งที่ไม่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน ณ ความถี่ที่ต้องการวัดมวล ด้วยเหตุนี้จึงเป็นไปได้ที่จะสามารถให้มาตรวัดมวล (coriolis mass flowmeter) ทำงานได้ช่วงการทำงานกว้างภายใต้สภาวะการใช้งานจริง ซึ่งอาจมีเสียงดังจากปั๊ม, compressors, มอเตอร์หรืออุปกรณ์อื่นๆ ในระบบท่อหรือจากระบบใกล้เคียง

## **ความปลอดภัย (Safety)**

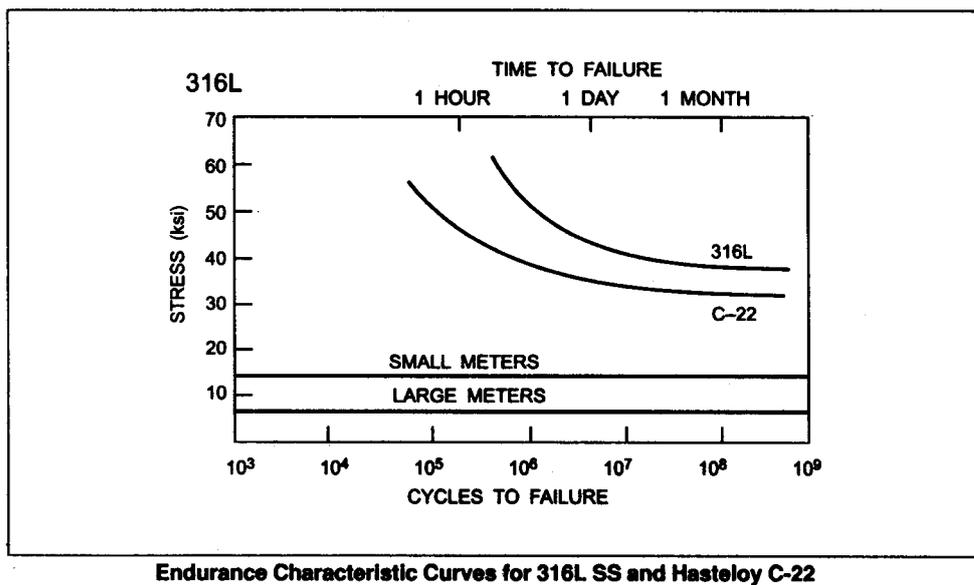
### **ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ (Hazardous Area Location)**

ความปลอดภัยเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องให้ความสนใจอย่างยิ่งเนื่องจากอาจสร้างความเสียหายให้แก่ทรัพย์สินแล้วอาจก่อให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้เช่นกัน เนื่องจากอุปกรณ์การทำงานของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) จำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้าซึ่งอาจเกิดประกายไฟขึ้นได้ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้สำหรับการวัดนั้นจำเป็นต้องได้รับการออกแบบเป็นไปตามมาตรฐานสากลที่กำหนดไว้ เช่น อุปกรณ์ถ่ายถอดสัญญาณ ควรได้รับมาตรฐาน IEEE จัดอยู่ในประเภท DIV I หรือ DIV II เป็นต้น

### **วัสดุใช้ทำหน่วยวัด**

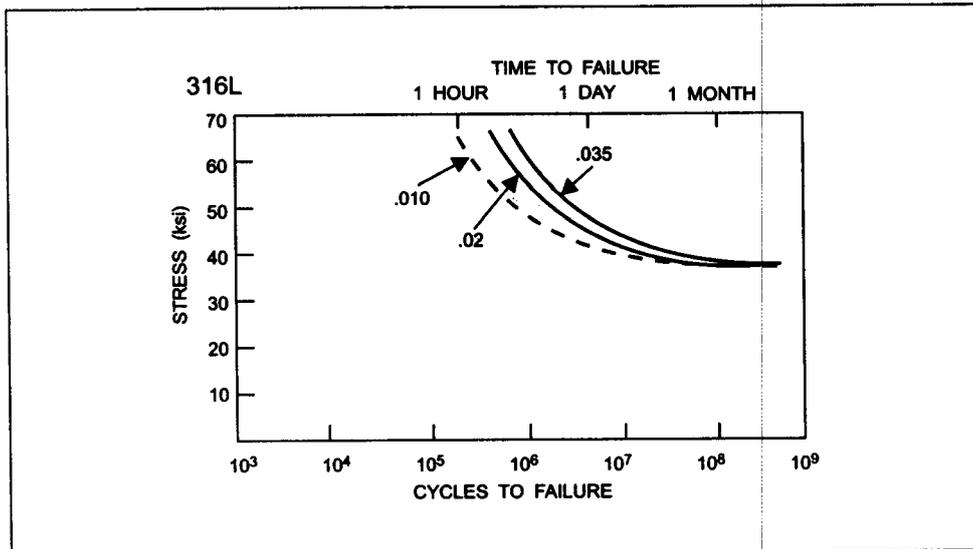
เนื่องจากมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) มีหลักการทำงานโดยใช้การสั่นของท่อวัด ดังนั้นจึงเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่เพียงส่วนเดียวและต้องคำนึงถึงความปลอดภัยหากท่อวัดมีการพังหรือร้าวเกิดขึ้นได้ ความแข็งแรงต่อการล้า (fatigue strength) ของท่อ

วัดจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบท่อวัด ความแข็งแรงต่อการล้าเป็นความสามารถของวัสดุที่สามารถต้านทานต่อการหัก, แตกหรือเสื่อมสภาพเมื่อรองรับแรงที่มีลักษณะกระทำต่อวัสดุเป็นรอบๆอย่างต่อเนื่อง (cyclic loading) ความสามารถในการทนทานต่อภาระแรงดังกล่าวของโลหะสแตนเลส (stainless steel) และอัลลอยด์ Hastelloy C-22 แสดงดังในรูปที่ 38 เป็นการแสดงค่าขอบเขตสูงสุดที่วัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถทนได้ต่อภาระแรงเป็นรอบๆ ดังนั้นท่อวัดซึ่งทำด้วยวัสดุดังกล่าวจะไม่เกิดการพังหรือเสียหายหากได้รับความเครียด (stress)จากการสั่นไม่เกินกว่าขอบเขตดังแสดงในรูปที่ 38



รูปที่ 38 แสดงความทนทานต่อการรับภาระแรงเป็นรอบๆ (cyclic loading) ของ 316L และ Hastelloy C-22

ความเครียด (stress)จากการสั่นที่เกิดขึ้นของท่อวัด ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ขึ้นลงสูงสุดของการสั่น, รูปร่างของท่อวัด เป็นต้น บริษัทผู้ผลิตบางรายได้มีอุปกรณ์จำกัดระยะเวลาการสั่นขึ้นลงสูงสุดเอาไว้ภายในหน่วยวัดเพื่อป้องกันท่อวัดพังเมื่อช่วงเริ่มทำงานและช่วงหยุดทำงานของท่อวัดซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่การสั่นอย่างรุนแรง ด้วยเหตุนี้วัสดุพวกโลหะไร้สนิม (stainless steel) และโลหะอัลลอยด์ที่มีส่วนผสมของนิกเกิลสูงจะมีคุณสมบัติทนต่อการรับภาระแรงเป็นรอบๆ (cyclic loading) ได้สูง นอกจากนี้คุณสมบัติกายภาพยังสามารถมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะการล้าเหลวของท่อวัดภายใต้การสั่นอีกด้วย กราฟในรูปที่ 39 แสดงให้เห็นข้อมูลที่น่าสนใจอย่างหนึ่งว่าหลังจากการทดลองพบว่า ขอบเขตของการทนต่อภาระแรงเป็นรอบๆ (cyclic loading) ขึ้นอยู่กับความหนาของท่อวัด นั่นคือท่อยิ่งหนาขึ้นขอบเขตดังกล่าวยิ่งสูงขึ้นตามด้วย



Endurance Characteristic Curves for Various Wall Thicknesses of Tubing

รูปที่ 39 แสดงความทนทานต่อการรับภาระแรงเป็นรอบๆ (cyclic loading) เมื่อความหนาของผนังท่อวัดแตกต่างกัน

สภาวะของระบบของเหลวซึ่งต้องการวัดก็เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะที่แตกต่างกันไปต่อการล้มเหลวของท่อวัดซึ่งทำด้วยวัสดุหลากหลายภายใต้การสั่นได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น โลหะไร้สนิม (stainless steel) ซึ่งมีคุณสมบัติต่อการกัดกร่อนสูง แต่พบว่าจะมีการเกิดหลุมเล็กๆบริเวณผิว (pitting) โลหะไร้สนิมอื่นเนื่องจากพบว่ามีสารคลอไรด์ (chlorides) เจือปนปรากฏอยู่ในของเหลวที่ทำการวัดอยู่ ส่งผลให้เกิดความเครียดบริเวณหลุมดังกล่าวสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปและทำให้อายุการใช้งานของมาตรวัดต่ำลงด้วย วิธีแก้ปัญหากกระทำโดยเลือกวัสดุชนิดใหม่ซึ่งทนต่อสารคลอไรด์ (chlorides) ได้แก่พวกโลหะอัลลอยด์ Hastelloy alloys , titanium และ tantalum จากตารางที่ 2 เป็นตารางตัวอย่างในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำท่อวัดสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป แต่เพื่อให้เกิดความมั่นใจควรปรึกษาบริษัทผู้ผลิตอีกครั้งหนึ่ง

Table Working Pressure Ratings for Process Connections (Pressure in psig)						
Flange	Class	Mat'l	-20 to 100°F	200°F	300°F	400°F
ANSI (per B 16.5)	150 lb	316L	230	195	175	160
	150 lb	304	275	235	205	180
	300 lb	316L	600	505	455	415
	300 lb	304	720	600	530	470
	600 lb	316L	1200	1015	910	825
	600 lb	304	1440	1200	1055	940
			15 to 250°F			
DIN (per DIN 2401, Part 2)	PN40	316L	580			
JIS (per JIS B 2212)	10K	316L	140			

ตารางที่ 1 ความดันทนได้สูงสุดของหน้าแปลนมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter)

**Table Applications and the Appropriate Metallurgy**

Stainless steels are acceptable with:	
Tar sands	Nitric acid
Paint	Isopropanol
Magnetic tape slurries	Lime slurries
Adhesives	Sour crude (H <sub>2</sub> S and H <sub>2</sub> O)
Polymers	CNG
Urethane	Liquified gases N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , LPG
Olefins	Milk cream
Sodium hydroxide	Peanut butter
Potassium hydroxide	Pie fillings
Fuel oils	Fruit juices
Ethylene oxide	Fatty acids
Polypropylene	Beer, beer foam
Asphalt	
Molten sulfur	
Stainless steels are not acceptable with the materials listed below; Hastelloy C-22 should be used with:	
Acetic acid (high concentrations and elevated temperatures)	
Ammonium chloride	
Bromine	
Calcium chloride	
Iodine (other than 100% dry)	
Mustard	
Seawater	
Dyes and inks (if Cl bearing)	

## ตารางที่ 2 การเลือกวัสดุให้เหมาะกับของเหลวที่ต้องการวัด

สิ่งที่ต้องคำนึงอีกอย่างหนึ่งคือตัวเรือน (casing) ของหน่วยวัดควรได้รับการออกแบบให้มีตัวตรวจจับหากมีของเหลวของระบบหลุดออกมาจากท่อวัดก็ให้ส่งสัญญาณเตือนหรือควรมี rupture discs เพื่อระบายความดันออกจากตัวเรือน เป็นต้น

สำหรับการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งต้องใช้ในการตรวจจับสัญญาณที่มีค่าเล็กมากก็เป็นเรื่องที่น่าวิตกมากเรื่องหนึ่ง ทั้งนี้เพราะสัญญาณ  $\Delta t$  ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีคุณค่าและสำคัญมากที่สุดในการวัดอัตราการไหลของมาตรวัดมวลซึ่งมีค่าเป็นนาโนวินาที (nanosecond range) เมื่อ 1 นาโนวินาที คือเวลาที่สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (electronic signal) ใช้เคลื่อนที่ไปได้ 30 เซนติเมตร (1 ฟุต) ในตัวนำไฟฟ้า นั้นหมายถึงต้องให้ความสนใจในความล่าช้าในการส่งสัญญาณผ่านสายไฟฟ้า , ตัวนำในแผงวงจร (printed circuit board conductors) และ logic gate เพื่อที่จะสามารถวัดเวลาช่วงสั้นๆ  $\Delta t$  ได้อย่างแม่นยำ ตลอดจนต้องป้องกันแหล่งกำเนิดสัญญาณเสียงอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อระบบกวนสัญญาณที่ต้องการได้ นอกจากนี้ขั้นตอนการจัดการส่งสัญญาณ ตลอดจนการกรองสัญญาณก็ต้องให้ความสนใจสูงเช่นกัน

## สมรรถนะและข้อจำกัดการใช้งานมาตรวัดมวลคอริออริส (Performance and Limitations of Working)

ในท้องตลาดมาตรวัดมวลชนิดนี้มีขนาดตั้งแต่ 1/16 นิ้ว จนถึง 6 นิ้ว ด้วยอัตราการไหลมวลตั้งแต่ 2-3 กรัม/ชม. จนถึง 10 ตัน/นาที่ เนื่องจากมาตรวัดมวลคอริออริส (coriolis mass flowmeter) จัดอยู่ในกลุ่มมาตรวัดชนิดเชิงเส้น (linear flowmeter) โดยมาตรวัดมวลจะให้สัญญาณหลังจากทำการวัดอัตราการไหลมวล (output) เป็นสัดส่วนค่อนข้างเป็นเชิงเส้นตรง (linear) เมื่อเทียบกับอัตราการไหลมวล หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าเป็นมาตรวัดชนิดที่ให้สัญญาณหลังจากทำการวัดหลังจากวัดไม่เป็นสัดส่วนกับอัตราการไหลยกกำลังสองหารด้วยความหนาแน่นของของเหลวซึ่งทำการวัดอยู่แต่อย่างใด ดังนั้นมาตรวัดจึงสามารถใช้งานได้ค่อนข้างมีช่วงกว้างมาก โดยทั่วไปมาตรวัดมวลคอริออริส (coriolis mass flowmeter) มีช่วงสามารถวัดได้ 25:1 จนถึง 100:1 โดยยังให้ความถูกต้องน่าเชื่อถือสูงในการใช้งานบ้างประเภท

### ความแม่นยำ (accuracy) และ ความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability)

ความแม่นยำในการวัด (accuracy) ของมาตรวัดมวลคอริออริส (coriolis mass flowmeter) ชนิดนี้มีค่าตั้งแต่  $\pm 0.15\%$  จนถึง  $\pm 0.25\%$  ที่อัตราการไหลนั้นๆ บวกด้วยค่าผิดพลาดหนึ่งศูนย์ ("a zero shift error" หรือ บางบริษัทผู้ผลิตเรียกว่า "zero stability")

$$\text{Accuracy} = \pm \text{Basic Accuracy} \pm \text{a zero shift error}$$

หรือ

$$\text{Accuracy} = \pm \text{Percent of Rate} \pm \text{a zero shift error.} \quad (29)$$

ค่าผิดพลาดหนึ่งศูนย์ (a zero shift error) คือค่าการหนีหรือเอียงในปริมาณเล็กๆ ของทั้งหน่วยวัด (sensor unit) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ด้วยเหตุนี้ผู้ผลิตส่วนใหญ่มักกำหนดค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) ของมาตรวัดที่สภาวะไม่มีการไหลหรืออัตราการไหลมีค่าเท่ากับศูนย์เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของพิสัยของมาตรวัดของหน่วยวัด (the meter capacity of the sensor unit) ค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) นี้จะถูกรวมเข้ากับความแม่นยำ (accuracy) และ จะกลายเป็นส่วนที่มีผลอย่างมากต่อความแม่นยำตลอดช่วงการวัดโดยเฉพาะบริเวณช่วงการวัดเริ่มต้นของพิสัย (lower end of the flow rate)

สำหรับความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability) ของมาตรวัดมวลนั้นจะมีค่าในช่วงระหว่าง 0.03 -0.05% แต่ทั้งนี้และทั้งนั้นอาจมีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ได้ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต

**ตัวอย่าง** มาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) มีช่วงการวัดได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1,000 lb/min (ดูรูปที่ 40) มีค่าความแม่นยำที่อัตราไหลนั้น (Percent of Rate) เท่ากับ  $\pm 0.15\%$  และมีค่าผิดพลาดหนีศูนย์ (a zero shift error) เท่ากับ 0.025 lb/min หรือ 0.0025% of meter capacity ดังนั้นที่อัตราการไหลมวลที่ 4% ของพิกัดกำลังของมาตรวัด หรือที่อัตราการไหล (flowrate) เท่ากับ 40 lb/min จะมีความแม่นยำมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Accuracy} &= \pm 0.15\% \text{ Percent of Rate } \pm 0.025 \text{ lb/min} \\ &= \pm (0.0015 \times 40) \pm 0.025 \\ &= \pm 0.085 \text{ lb/min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{flow accuracy at 40 lb/min} &= \pm \left( \frac{0.085}{40} \times 100 \right) \\ &= \pm 0.212 \% \end{aligned}$$

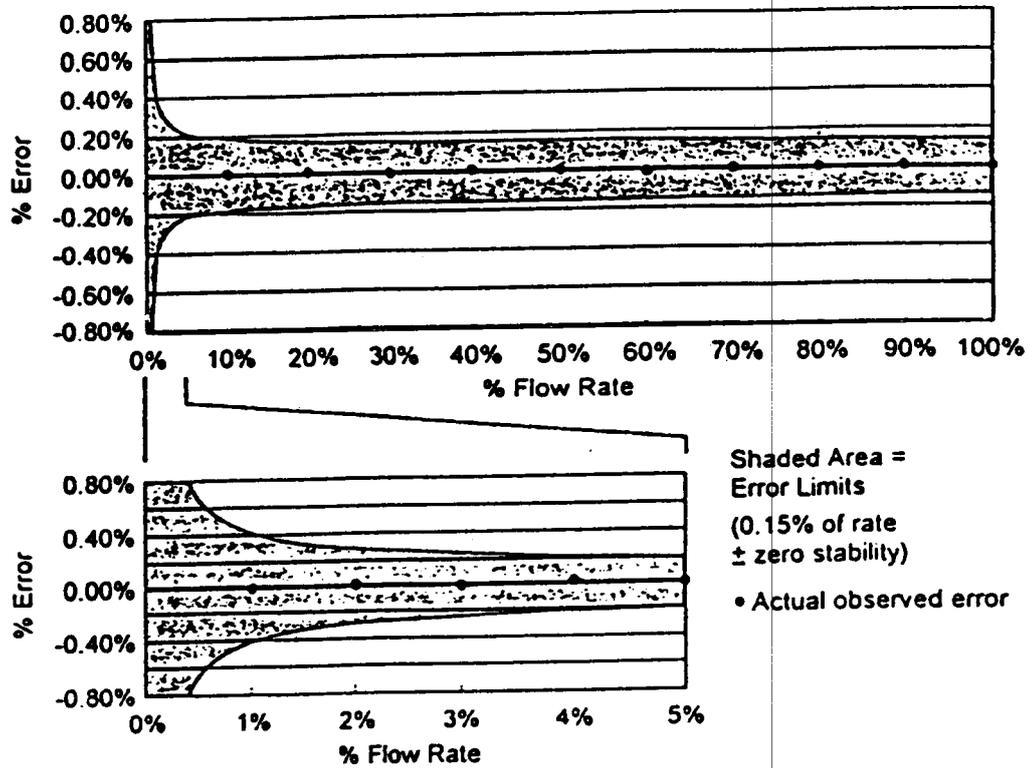
จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดหนีศูนย์ (a zero shift error) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.025 lb/min มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าความไม่แน่นอนถึง 30%  $\left( \frac{0.025}{0.085} \times 100 = 29.41\% \right)$  ของค่าความไม่แน่นอนทั้งหมด

คราวนี้เราจะทำการหาค่าความแม่นยำที่อัตราการไหลมวลที่ 40% ของพิกัดกำลังของมาตรวัด หรือที่อัตราการไหล (flowrate) เท่ากับ 400 lb/min จะมีความแม่นยำมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Accuracy} &= \pm 0.15\% \text{ Percent of Rate } \pm 0.025 \text{ lb/min} \\ &= \pm (0.0015 \times 400) \pm 0.025 \\ &= \pm 0.625 \text{ lb/min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{flow accuracy at 400 lb/min} &= \pm \left( \frac{0.625}{400} \times 100 \right) \\ &= \pm 0.156 \% \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดนี้ศูนย์ ( a zero shift error ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.025 lb/min มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าความไม่แน่นอนเพียง 4% (  $\frac{0.025}{0.625} \times 100 = 4\%$  ) ของค่าความไม่แน่นอนทั้งหมด



### ELITE Performance Curves

รูปที่ 40 ตัวอย่างกราฟแสดงสมรรถนะของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter)

เนื่องจากผลของค่าผิดพลาดนี้ศูนย์ ( a zero shift error ) ดังนั้นจึงส่งผลให้มาตรวัดมวลมีความแม่นยำลดลงบริเวณอัตราการไหลเข้าใกล้ศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถเลือกมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ได้หลายขนาดสำหรับการวัด พบว่ามาตรวัดยังมีขนาดใหญ่ยิ่งจะมีความความดันตกคร่อมตัวมาตรวัดขณะใช้งานต่ำกว่ามาตรวัดซึ่งมีขนาดเล็ก อีกทั้งสามารถใช้งานได้ในช่วงอัตราการไหลต่ำๆ ได้ด้วยความแม่นยำที่ดีกว่าอีกด้วย ด้วยเหตุนี้การเลือกขนาดของมาตรวัดให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการวัดอัตราการไหลได้ถูกต้องแม่นยำเพื่อที่ลดปัญหาของความแม่นยำการวัดซึ่งลดลงในช่วงอัตราการไหลต่ำๆ ให้หมดไปหรือเลือกขนาดมาตรวัดซึ่งจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการวัดอัตราการไหลมวลที่อัตราการไหลต่ำๆ ให้น้อยมากที่สุด

Fig. 1

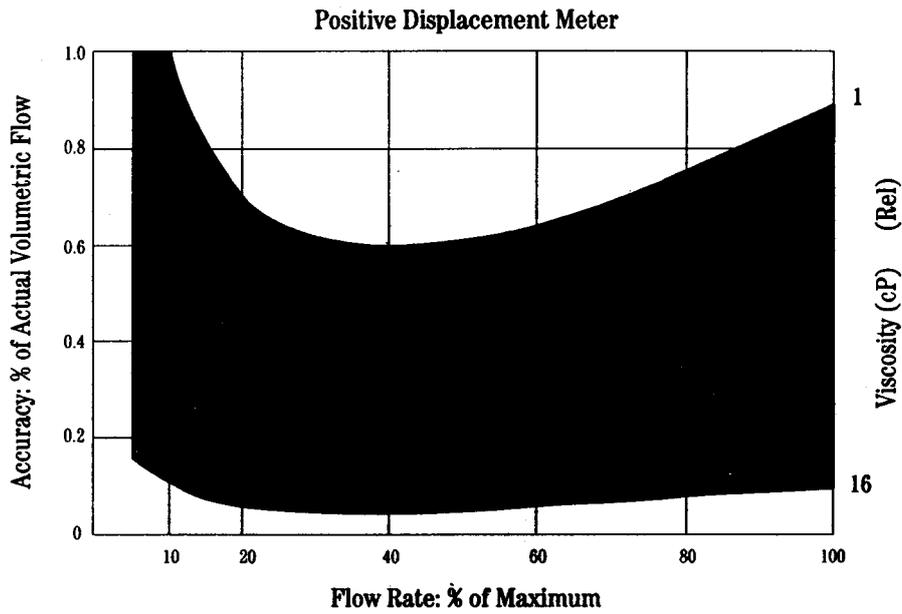
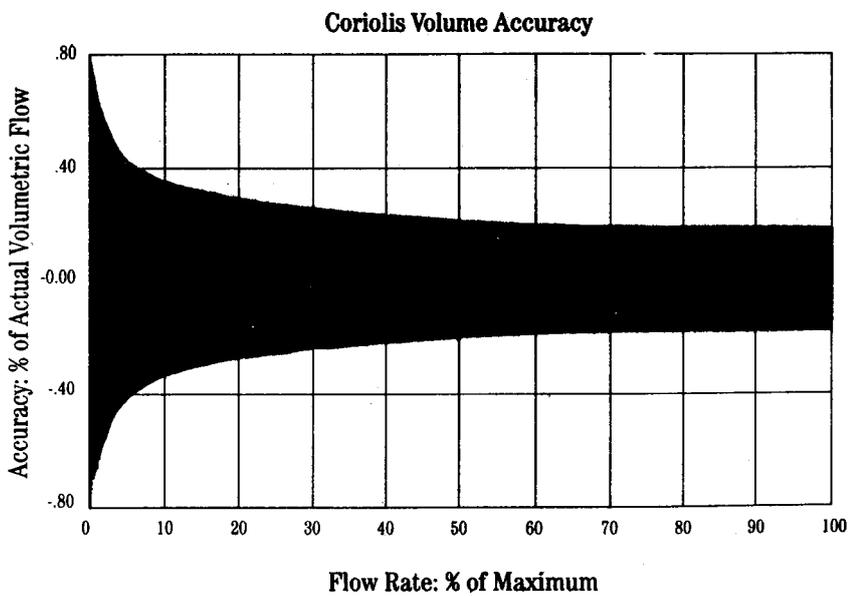


Fig. 2



รูปที่ 41 ตัวอย่างการเปรียบเทียบกราฟแสดงสมรรถนะของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) กับมาตรวัดชนิด Positive Displacement

เพื่อที่จะให้ได้ประสิทธิภาพและสมรรถนะที่ดีบริเวณช่วงอัตราการไหลต่ำๆ มากที่สุดเท่าที่กระทำได้ มาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) จึงมีขีดความสามารถในการปรับค่าศูนย์ได้หลังจากทำการติดตั้งเข้ากับระบบท่อของของเหลวที่ต้องการวัดอัตราการไหลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว การปรับค่าศูนย์ (zero adjustment) กระทำโดยปล่อยให้ของเหลวไหลผ่านมาตรวัดมวลคอริโอลิสจนมีค่าอุณหภูมิเช่นเดียวกับอุณหภูมิของเหลวที่ต้องการวัดจริงจากนั้นทำ

การปิดด้านทางออกมาตรวัดแล้วทำการปรับศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากพบว่าการที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบบ้างต่อการหนีศูนย์ (zero offset) ด้วยเหตุนี้ผู้ผลิตมาตรวัดมวลคอริโอลิสส่วนใหญ่จะทำการแนะนำให้ทำการปรับศูนย์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแต่มีค่าไม่เกินภายในช่วง 10 °C ของอุณหภูมิใช้งานจริง (the actual operating temperature)

เช่นเดียวกับมาตรวัดต่างๆ ความแม่นยำของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis mass flowmeter) จะได้รับผลกระทบหากพบว่ามีก๊าซหรือฟองอากาศผสมอยู่ในของเหลวซึ่งทำการวัดอัตราการไหลมวลอยู่ขณะนั้น โดยก๊าซหรือฟองอากาศผสมอยู่ในของเหลวถึงแม้จะมีการผสมรวมกับน้ำเป็นอย่างดีก็ยังคงส่งผลกระทบให้มาตรวัดมวลคอริโอลิสต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในการทำให้ท่อวัด (measuring tubes) สั่นสะเทือน แต่ถ้าหากก๊าซหรือฟองอากาศผสมอยู่ในของเหลวมีการระเบิด ก่อให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในของเหลวจะทำให้สมรรถนะของมาตรวัดมวลคอริโอลิสลดลงเนื่องจากเกิดการหน่วงการสั่นของท่อวัด (viscous damping of the vibrating tube) ช่องว่างที่เกิดขึ้นส่วนเล็กน้อยจนถึง 5% โดยปริมาตรของท่อวัดจะมีผลทำให้เกิดสัญญาณเสียงดังขึ้นขณะของไหลไหลผ่านท่อวัดเนื่องจากการที่ก๊าซและอากาศผสมกับของเหลว (เรียกว่า "sloshing") ภายในท่อวัดซึ่งสั่นอยู่ และเสียงที่เกิดขึ้นนี้จะไปรบกวนการส่งสัญญาณการบิดตัวของท่อวัด (Coriolis twist signal) ไปยังหน่วยอิเล็กทรอนิกส์ ในกรณีมีช่องว่างภายในท่อวัดมากๆ จนสามารถเป็นเหตุให้ท่อวัดหยุดการสั่นได้เพราะว่าเกิดการดูดซับพลังงานจากการสั่นของท่อวัดเนื่องจากมีการผสมก๊าซและอากาศผสมกับของเหลว (sloshing) ภายในท่อวัดมากเกินไปกว่าตัวกำเนิดสั่นสะเทือน (drive coil) ขับได้

การติดตั้งตัวกำจัดก๊าซ (air eliminator) เข้ากับระบบการวัดอัตราการไหลมวลด้วยมาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis mass flowmeter) จึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นเพื่อป้องกันการไหลของเหลวโดยมีก๊าซผสมอยู่ทำให้ไหลไม่สม่ำเสมอเป็นครั้งคราว (หรือรูปแบบการไหลเรียกว่า "slug flow" ดูรูปที่ 42) เพื่อไม่ให้กระทบหรือลดความแม่นยำในการทำงานของมาตรวัด แต่มีข้อสังเกตว่า ถึงแม้ว่าเกิดการไหลของเหลวขาดตอนไม่สม่ำเสมอเพราะมีก๊าซผสมอยู่ (slug flow) ภายในท่อวัดจนทำให้ไปรบกวนสัญญาณการบิดตัวของท่อที่ต้องการหมดไปก็ตาม ท่อวัดก็ยังคงไม่ได้รับความเสียหายแต่อย่างใด

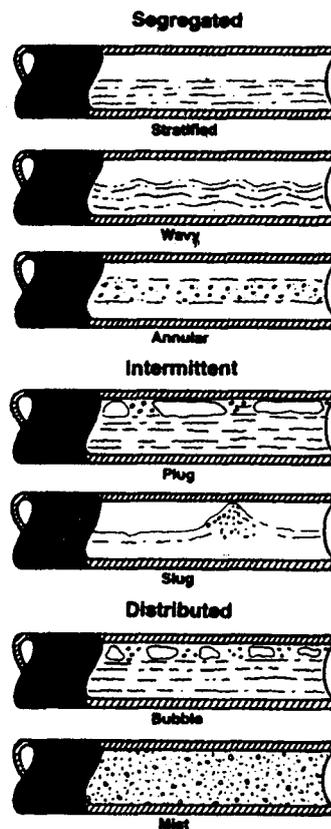
สภาวะการไหลของเหลวไม่สม่ำเสมอเป็นครั้งคราวเพราะมีก๊าซผสมอยู่ (slug flow) สามารถทำการตรวจสอบได้ด้วยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ของมาตรวัดได้หลายกรณีเช่นกัน เช่น มาตรวัดจะมีการเพิ่มกำลังในการสั่น, หยุดการวัดความหนาแน่น หรือทำการลดการขยายสัญญาณของตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ (motion sensor) หรือในบางผู้ผลิตได้มีอุปกรณ์เสริมสามารถหยุดส่งสัญญาณการบิดตัวของท่อออกมาหรือมีการส่งสัญญาณเตือนเสียงออกมาเมื่อ

มาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ไม่สามารถทำการวัดอัตราการไหลด้วยความแม่นยำตามที่ต้องการระหว่างเกิดสภาวะการไหลของเหลวไม่สม่ำเสมอเป็นครั้งคราวเพราะมีก๊าซผสมอยู่ (slug flow) ) สำหรับกรณีท่อวัดที่มีการสั่นที่ไม่สมดุลย์อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเหลวที่ไหลผ่านท่อก็อาจเป็นสาเหตุให้ได้สัญญาณที่สับสนและอาจลดความแม่นยำของการทำงานของมาตรวัดมวลคอริโอลิสได้

**หมายเหตุ** มาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) สามารถทำงานได้ในช่วงการวัดซึ่งกว้างมากหากใช้งานกับของเหลวและน้ำเสีย แต่จะมีข้อจำกัดการใช้งานหากนำไปใช้วัดอัตราการไหลมวลกับก๊าซ

**Type of Flow For Horizontal Pipes**

- Bubble or Froth: Bubbles dispersed in liquid
- Stratified: Liquid and gas flow in stratified layers
- Wave: Gas flows in top of pipe section, liquid in waves in lower section
- Slug: Slugs of gas bubbles flowing through the liquid
- Annular: Liquid flows in continuous annular ring on pipe wall, gas flows through center of pipe
- Plug: Plugs of liquid flow followed by plugs of gas
- Dispersed: Gas and liquid dispersed



Representative forms of horizontal two-phase flow patterns; same as indicated in Figure 2-40. By permission, Helm, H., *Oil and Gas Journal*, Aug. 2, 1982, p. 132.

รูปที่ 42 ลักษณะรูปแบบการไหลแบบ 2 สถานะภายในท่อซึ่งวางขนานกับพื้น

## การเลือกขนาดมาตรวัดมวลคอริออริส (coriolis mass flowmeter)

ในการเลือกมาตรวัดมวลคอริออริส (coriolis mass flowmeter) นั้นหลักในการพิจารณาหลักๆ ได้แก่

1. อัตราการไหล (flow rate) และขนาดท่อ (line size) ของระบบวัด นับเป็นปัจจัยสำคัญที่จะกำหนดขนาดของมาตรวัด โดยมีหลักการพิจารณาว่า

- ขนาดท่อ (nominal bore size) ของหน่วยวัด (sensor unit) ควรมีขนาดเท่ากับ หรือเล็กกว่าขนาดท่อของระบบท่อที่ทำการติดตั้งมาตรวัดมวลคอริออริส
- เพื่อให้ได้สมรรถนะที่เหมาะสมที่สุด ช่วงอัตราการไหลได้เต็มพิกัด (the normal full scale flow rate) ของมาตรวัด ควรมีค่าสูงมากเท่าที่กระทำได้ในช่วงความสามารถของมาตรวัดนั้นๆ โดยมีความดันตกคร่อมเท่าที่ยอมให้มีได้เมื่อเลือกมาตรวัด

2. ความดันและอุณหภูมิใช้งาน (Pressure and temperature ratings) ค่าความดันและอุณหภูมิของหน่วยวัดทำงานได้ รวมทั้งวิธีการต่อเชื่อมหน่วยวัดเข้ากับระบบท่อของของเหลวที่ต้องการวัดก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องให้ความสนใจเมื่อมีการเลือกมาตรวัด

ความดันของท่อวัดในหน่วยวัดที่สามารถทนทานได้ (the sensor tube pressure rating) ควรมีค่าสูงกว่าค่าความดันสูงสุดของระบบท่อ (the maximum rated pressure of the line) ซึ่งติดตั้งมาตรวัดมวลคอริออริส แต่ต้องระวังด้วยว่าความดันสูงสุดที่มาตรวัดทนได้ตามที่ผู้ผลิตกำหนดนั้นจะมีค่าลดลงหรือไม่เมื่อนำไปใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิต้องการตลอดจนลักษณะของงานที่นำมามาตรวัดไปใช้วัดอัตราการไหลมวล

ในส่วนวิธีการต่อเชื่อมหน่วยวัดเข้ากับระบบท่อก็ควรทำการเลือกให้เหมาะสมกับความดันทำงานสูงสุด (the maximum operating pressure) ในตารางที่ 1 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิใช้งาน (operating temperature) และความดันสูงสุด (the maximum rated pressure) ด้วยวิธีการต่อเชื่อมหน่วยวัดเข้ากับระบบท่อซึ่งมีการใช้งานกันทั่วไป โดยในตารางดังกล่าวเป็นเพียงตัวอย่างเพื่อแสดงให้เห็นเบื้องต้นเท่านั้น การเลือกมาตรวัดมวลคอริออริส (coriolis mass flowmeter) เพื่อใช้งานจริงจำเป็นต้องหาข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตซึ่งมีในท้องตลาดจะได้ข้อมูลที่ดีกว่า

3. ส่วนสัมผัสของเหลว (Wetted parts) การเลือกวัสดุของท่อวัด รวมทั้งส่วนต่างๆ ที่ต้องสัมผัสกับของเหลวต้องการวัดอัตราการไหลมวลให้เหมาะสมกันนั้น เป็น

เรื่องที่ต้องใช้ความระมัดระวัง เพราะการออกแบบท่อวัดการพิจารณา stress corrosion ค่อนข้างยากมาก การเลือกวัสดุสำหรับใช้ในการสร้างมาตรวัด ควรทนทานต่อการกัดกร่อนจากของเหลวหรือสิ่งแปลกปลอมเข้ามา อีกทั้งไม่ควรทำปฏิกิริยากับของเหลวซึ่งทำการวัด และง่ายต่อการกัดกร่อนทั้งทางเคมีและทางกายภาพ

โดยทั่วไป ท่อวัดซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสของเหลวทำด้วย เหล็กสแตนเลส 316L แต่ก็มีท่อวัดที่ทำด้วย Hastilloy® , Monel® ,Titanium ,Tantalum และอื่นๆ

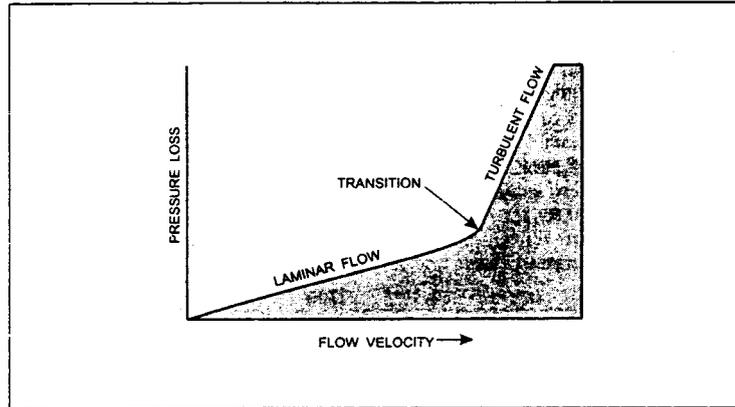
**4. ความดันตกคร่อม (Pressure drop)** ปกติครั้งที่เดียวที่ผู้ออกแบบระบบการวัดอัตราการไหลมวลจะพิจารณาความดันตกคร่อมมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) เป็นปัจจัยสำคัญ แต่ถ้าหากยอมรับได้ว่าระบบสามารถมีค่าความดันตกคร่อมมาตรวัดมีค่าสูงได้สิ่งที่พึงระมัดระวังตามมาก็คือการกัดกร่อนเชิงกล (erosion) อันเนื่องมาจากของเหลวอาจมีคุณสมบัติในการเสียดสีสูง (erosive fluid) ในที่นี้เราจะพิจารณาแบ่งความดันตกคร่อมออกเป็น 2 กรณีด้วยกันนั่นก็คือ กรณีที่ใช้มาตรวัดทำการวัดอัตราการไหลมวลของเหลว กับกรณีที่ใช้มาตรวัดทำการวัดอัตราการไหลมวลของก๊าซ

**4.1. ความดันตกคร่อมเมื่อทำการวัดของเหลว (Pressure drop for liquid)** โดยปกติแล้วผู้ผลิตจะให้กราฟความดันตกคร่อมมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ซึ่งเป็นการประยุกต์การหาค่าความดันตกคร่อมจาก Darcy' s formula ร่วมกับรูปร่างของท่อวัดแต่ละรูปแบบ พบว่าในช่วงการไหลแบบ Laminar (รูปแบบการไหลของเหลวอย่างมีระเบียบ) ความดันตกคร่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วการไหล(flow velocity) และความหนืด (viscosity)

$$\Delta P \propto V\mu$$

ส่วนการไหลในช่วงแบบ Turbulent (รูปแบบการไหลของเหลวปั่นป่วน) ความดันตกคร่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วการไหล(flow velocity)ยกกำลังสอง และความหนืด (viscosity)ยกกำลัง 1/4 ดังในรูปที่ 43

$$\Delta P \propto V^2\mu^{1/4}$$



**Flow Regimes**

**รูปที่ 43** การแบ่งขอบเขตของรูปแบบการไหลโดยใช้ Reynold Number

การกำหนดลักษณะรูปแบบการไหลภายในท่อว่าเมื่อไร การไหลเป็นแบบ Laminar flow หรือเป็นแบบ Turbulent flow จะถูกกำหนดด้วยค่า Reynold number ซึ่งไม่มีหน่วยกำกับ

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (30)$$

$$= \frac{v D}{\nu}$$

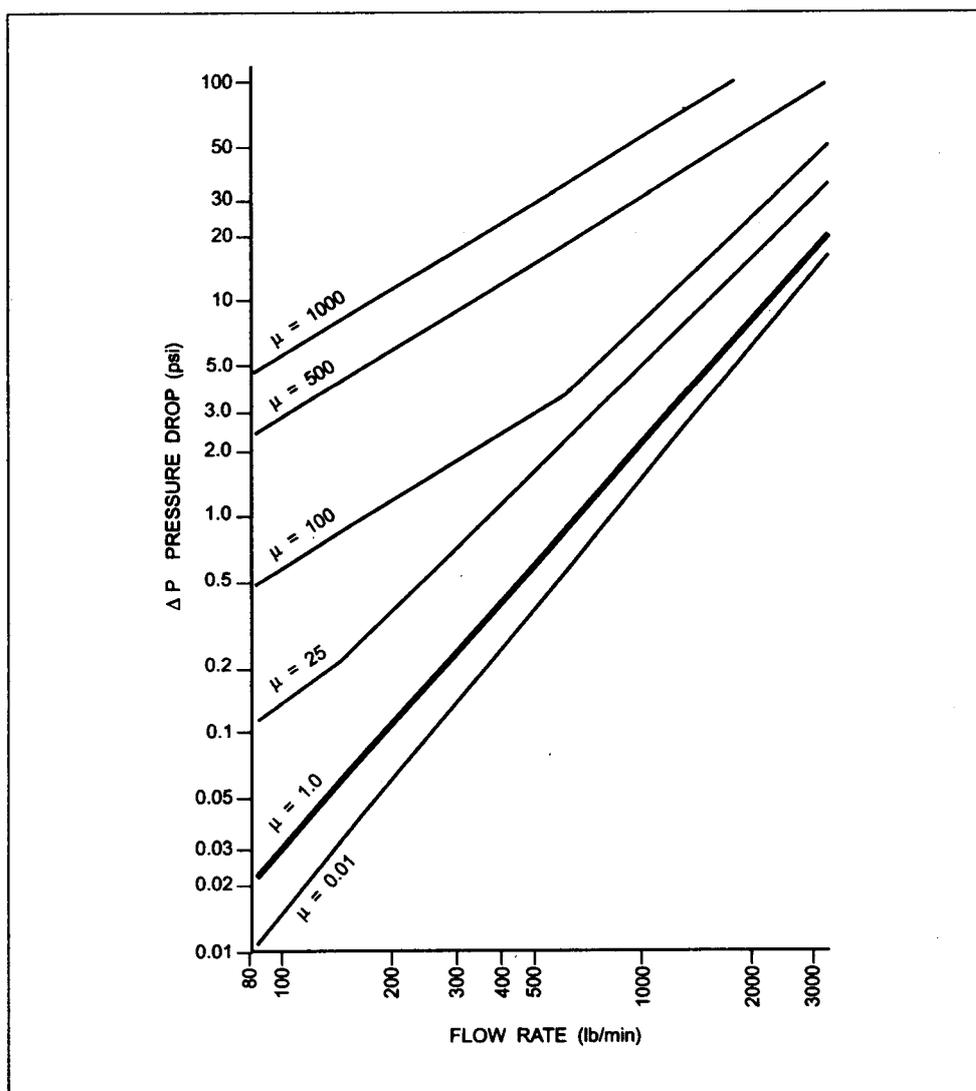
เมื่อ

- $Re_D$  = Reynold's number ของท่อ
- $\rho$  = ความหนาแน่นของเหลว
- $v$  = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลภายในท่อ
- $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ
- $\mu$  = ความหนืดสมบูรณ์ของเหลว (dynamic viscosity ; kg/m.s)
- $\nu$  = ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity ; m<sup>2</sup>/s)

เรากำหนดให้รูปแบบการไหลเป็นแบบ *Laminar flow* เมื่อหาค่า Reynold number เท่ากับ 2,000 หรือน้อยกว่า และกำหนดให้รูปแบบการไหลเป็นแบบ *Turbulent flow* เมื่อหาค่า Reynold number เท่ากับ 4,000 หรือมากกว่า โดยกำหนดให้รูปแบบการไหลระหว่างค่า Reynold number มากกว่า 2,000 จนถึง 4,000 เรียกว่า *Transition flow* แต่โดยทั่วไปเรา

จะกำหนดให้ค่า Reynold number เท่ากับ 2,000 เป็นค่าแบ่งแยกขอบเขตระหว่างรูปแบบการไหลแบบ Laminar flow กับแบบ Turbulent flow

การใช้กราฟจากโรงงานผู้ผลิตมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) เพื่อกำหนดขนาดมาตรวัด โดยทั่วไปมักเป็นการเขียนกราฟด้วยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลมวลกับความดันตกคร่อมซึ่งถูกหารด้วยความถ่วงจำเพาะของเหลวที่ต้องการวัด (specific gravity of process liquid) เทียบกับน้ำ ดังนั้นกราฟในรูปที่ 44 จึงเป็นหน่วยวัดอัตราการไหลมวลของน้ำ



Pressure Drop Curves

รูปที่ 44 ความดันตกคร่อมมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ของของเหลวซึ่งมีค่าความหนืดแตกต่างกัน

ในกรณีที่จำเป็นต้องเลือกใช้มาตรวัดสำหรับวัดของเหลวซึ่งมีความหนืดสูงให้ทำการปรึกษาผู้ผลิต

ในการเลือกมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) สำหรับใช้งานในการวัดอัตราการไหลมวล นอกเหนือจากคำนึงถึงความดันตกคร่อมแล้วควรคำนึงถึง

- ช่วงอัตราการไหลที่วัดได้ (Full scale flow rate)
- ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น (Available pressure drop)
- ความหนืดของเหลวที่ทำการวัด ณ สภาวะการทำงานของมาตรวัด (Process fluid viscosity at operating conditions)
- ความหนาแน่นของเหลวที่ทำการวัด (Process fluid density)

**หมายเหตุ** เราสามารถพอประมาณได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อม (pressure drop) กับความหนืด (viscosity) เป็นเชิงเส้น เพื่อสามารถหาค่าความดันตกคร่อมมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ได้เมื่อใช้กับของเหลวซึ่งมีความหนืดสูง ขณะที่มีการไหลแบบ Laminar flow

**4.2. ความดันตกคร่อมเมื่อทำการวัดก๊าซ (Pressure drop for gas)** เนื่องจากแนวโน้มที่ก๊าซมีสภาวะความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำ (a relative low density condition) ดังนั้นโอกาสที่จะให้ผลการวัดอัตราการไหลมวลที่แม่นยำเมื่อความดันภายในท่อต่ำกว่า 5 barg (72.5 psig) แทบจะเป็นไปไม่ได้เลย เพราะว่าโดยทั่วไปความหนืดของก๊าซ (gas viscosity) มีค่าน้อยกว่า 0.02 centipoise ดังนั้นรูปแบบการไหลของก๊าซแทบจะเป็นแบบ Turbulent จากกราฟความดันตกคร่อมของบริษัทผู้ผลิตซึ่งอ้างอิงถึงการวัดการไหลของน้ำนั้น เราสามารถใช้กราฟดังกล่าวเพื่อทำนายความดันตกคร่อมมาตรวัดเมื่อใช้วัดก๊าซได้ โดยหาค่าสัดส่วนระหว่างความหนาแน่นของก๊าซที่สภาวะทำงาน (operating condition) เทียบกับความหนาแน่นของน้ำที่สภาวะมาตรฐาน (a standard condition) จากนั้นนำค่าอัตราส่วนดังกล่าวไปหารความดันตกคร่อมซึ่งหาได้จากกราฟความดันตกคร่อมมาตรวัดซึ่งอ้างอิงการวัดการไหลของน้ำ เราก็จะรู้ความดันตกคร่อมมาตรวัดเมื่อใช้วัดอัตราการไหลของก๊าซ

พบว่าความดันตกคร่อมมาตรวัดของก๊าซยังขึ้นอยู่กับความดันรวมภายในท่อทั้งหมด (total line pressure) ดังนั้นหากคำนวณความดันตกคร่อมของก๊าซมีค่ามากกว่า 10% เมื่อเทียบกับความดันสมบูรณ์ภายในท่อ (the absolute line pressure) นั้นหมายถึงความหนาแน่นของก๊าซจะมีเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อไหลผ่านมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) และยังเป็นสาเหตุให้ความดันตกคร่อมจริงๆ (actual pressure drop) สูงมากกว่า

ที่คำนวณได้จากกราฟด้วยวิธีการดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจำเป็นต้องทำการปรับแก้ไขค่าความดันตกคร่อมมาตรวัดเมื่อต้องใช้วัดอัตราการไหลมวลของก๊าซซึ่งมีความดันตกคร่อมของก๊าซมีค่ามากกว่า 10% เมื่อเทียบกับความดันสมบูรณ์ภายในท่อ ( the absolute line pressure) ด้วยตัวแปรแก้ไขค่า

$$F_{\text{correction}} = \frac{\Delta P_{\text{calc}}}{P} \quad (31)$$

เมื่อ

$\Delta P_{\text{calc}}$  = ความดันตกคร่อมมาตรวัดหาได้จากกราฟและคำนวณชดเชยความถ่วงจำเพาะ  
 $P$  = ความดันสมบูรณ์ภายในท่อ ( the absolute line pressure)

หากค่า  $F_{\text{correction}}$  มีค่ามากกว่า 0.4 นั้นหมายถึงเราควรเลือกขนาดมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถหาความดันตกคร่อมจริงๆ (actual pressure drop) ภายใต้สภาวะเงื่อนไขดังกล่าวด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\Delta P = \Delta P_{\text{calc}} (1 + 2F_{\text{correction}}) \quad (32)$$

ต้องระวังว่า ค่าความดันตกคร่อมมาตรวัดซึ่งคำนวณได้จากสมการข้างบนนี้ไม่ได้รวมเอาค่าความดันตกคร่อมของระบบท่อซึ่งได้ทำการติดตั้งมาตรวัดไม่ว่าจะเป็นท่อขยายหรือท่อลด (reducers) ก่อนหรือออกจากมาตรวัด แต่เป็นค่าความดันตกคร่อมเฉพาะตัวมาตรวัดเท่านั้น

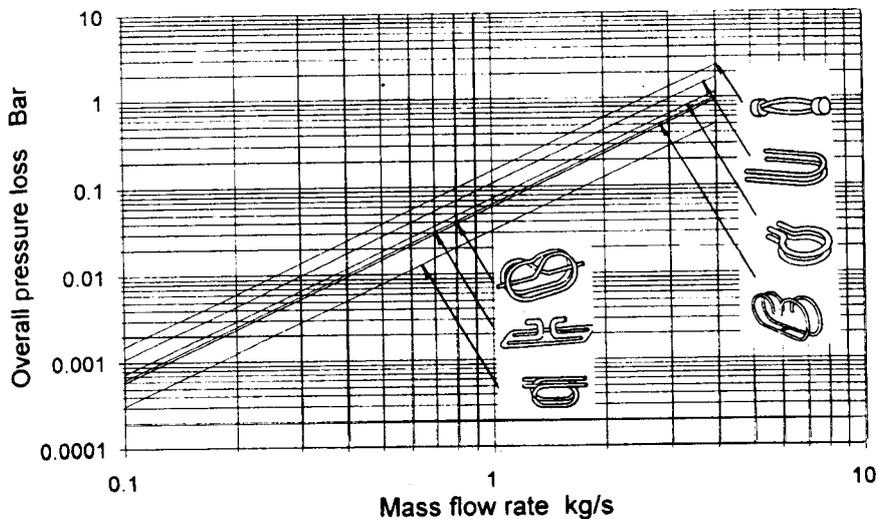


Figure Overall pressure loss for a 1 in (25 mm) Coriolis mass flowmeter.

รูปแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลมวลของมาตรวัดมวลคอริโอลิส ขนาด 25 มม.

5. **ขีดจำกัดความเร็วการไหล (Velocity limited)** ในกรณีที่เลือกใช้มาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis mass flowmeter) กับน้ำเสียต่างๆ (dirty liquid) หรือของเหลวมีสารแขวนลอย (slurry liquid) ในการเลือกมาตรวัดจำเป็นต้องกำหนดความเร็วของการไหล ไม่ควรเกินกว่า 10 ฟุต/วินาที (3 เมตร/วินาที) ทั้งนี้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนทางกล (erosion) กระทำต่อท่อวัดหรือส่วนที่สัมผัสกับของเหลวขณะทำการวัด

6. **ความแม่นยำ (accuracy)** การกำหนดบอกค่าความแม่นยำของมาตรวัดมวลคอริโอลิสโดยทั่วไปกำหนดอยู่ในรูปของ เปอร์เซ็นต์ของอัตรา (percent of rate) บวกกับค่าผิดพลาดหนึ่งศูนย์ (zero shift error) โดยส่วนของค่าผิดพลาดหนึ่งศูนย์ (zero shift error) จะบอกค่าในรูปของ เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกำลังของมาตรวัด (percent of meter capacity) ดังนั้นความแม่นยำจะได้รับผลกระทบจากค่าผิดพลาดหนึ่งศูนย์ในช่วงอัตราการไหลค่อนข้างต่ำมาก ดังแสดงในรูปที่ 40 เป็นกราฟแสดงค่าความแม่นยำของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis mass flowmeter) ซึ่งมีค่าความแม่นยำเท่ากับ  $\pm 0.15\%$  ของอัตรา (of rate) และค่าผิดพลาดหนึ่งศูนย์ (zero shift error)  $\pm 0.0025\%$  ของพิกัดกำลังของมาตรวัด (of meter capacity)

### ตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคของมาตรวัดมวลคอริโอลิสทั่วไป

TABLE Typical Coriolis Mass Flowmeter Specifications

Line size	0.2 to 24 in (5 to 600 mm)
Mass flow rate	Low range 0 to 7 lb <sub>m</sub> /h (0 to 3 kg/h) High range 0 to 150,000 lb <sub>m</sub> /h (0 to 680,000 kg/h)
Accuracy (uncertainty)	$\pm 0.25\%$ , $\pm$ zero stability
Zero stability	$\pm 0.02\%$ URV
Precision	+ 0.10%
Density measurement	0 to 190 lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup> (0 to 3,000 kg/m <sup>3</sup> )
Accuracy (uncertainty)	$\pm 0.0002$ g/cm <sup>3</sup> to $\pm 0.01$ g/cm <sup>3</sup>
Pressure	Up to 5700 psig (393 bar, gauge) Minimum: May apply; check with manufacturer
Pressure loss (overall pressure loss)	Refer to manufacturer
Rangeability	20:1 to 100:1 depending on accuracy requirements (see accuracy)
Temperature	-420 to 380°F (-200 to 190°C)

Source: Baker (1994).

### หมายเหตุ

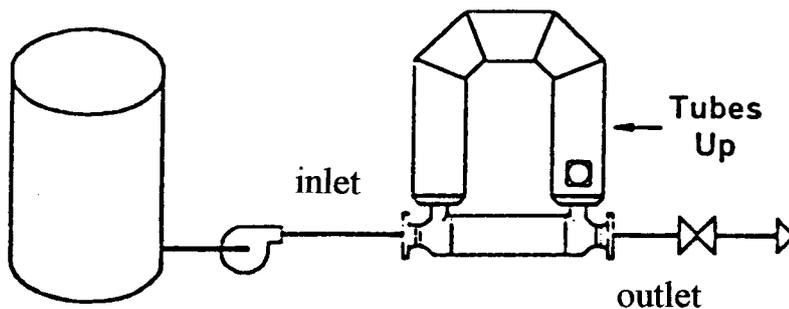
URV = Upper range value

# บทที่ 4

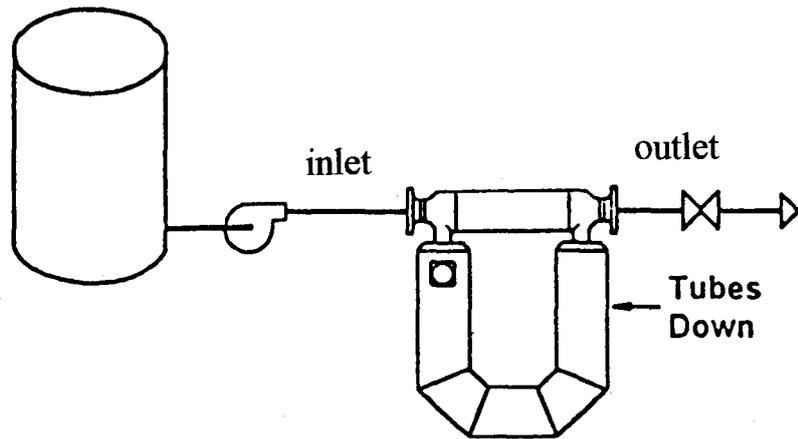
## การติดตั้งและการบำรุงรักษา (Installation and Maintenance)

ในการติดตั้งมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) จำเป็นต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดจากผู้ผลิตอย่างเคร่งครัดเพื่อให้ได้การทำงานของมาตรวัดที่มีสมรรถนะสูงตามที่ได้รับการออกแบบไว้ หากมีการใช้มาตรวัดเพื่อทำการวัดของเหลว การติดตั้งมาตรวัดมวลคอริโอลิสที่ดีต้องกระทำให้ของเหลวที่ต้องการวัดมีอยู่เต็มภายในมาตรวัดตลอดเวลาอีกทั้งยังคงรักษาสถานะของเหลวอยู่ตลอดช่วงระยะเวลาขณะทำการวัดอัตราการไหลมวล นั้นหมายถึงการติดตั้งมาตรวัดในทิศทางที่ไม่ให้เกิดอากาศหรือก๊าซถูกดักกักภายในท่อวัดขณะที่ของเหลวไหลผ่านได้เป็นอันขาด เนื่องจากมาตรวัดมวลชนิดนี้ไม่สามารถให้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำได้หากพบว่าภายในท่อวัดมีของเหลวผสมกับก๊าซหรือเกิดการไหลแบบ 2 สภาวะ (two-phase liquid) ภายในท่อวัด

1. **ทิศทางในการติดตั้ง (Orientation)** รูปร่างของมาตรวัดมวลโดยทั่วไปนิยมให้ส่วนที่มีของเหลวไหลผ่านถูกติดตั้งกับระบบท่อในแนวตั้ง (vertical pipe) และมีของเหลวไหลในท่อในทิศทางไหลขึ้นข้างบน ทั้งนี้เพราะแนวโน้มที่ของเหลวไหลเต็มท่อวัด (sensor) ตลอดเวลาในทิศทางนี้เป็นไปได้สูง (ดูรูปที่ 45 และ 46) และในทิศทางการติดตั้งเช่นเดียวกันนี้จะเหมาะกับมาตรวัดมวลซึ่งใช้กับการวัดของเหลวซึ่งมี 2 สภาวะ (two-phase liquid) เช่นก๊าซผสมอยู่กับของเหลว แต่อย่างไรก็ตามมาตรวัดมวลซึ่งมีรูปแบบแตกต่างออกไปอาจจะเหมาะกับการติดตั้งกับระบบท่อในอีกทิศทางหนึ่งก็ได้ ทั้งนี้แต่ผู้ออกแบบมาตรวัดมวลชนิดนั้นๆ

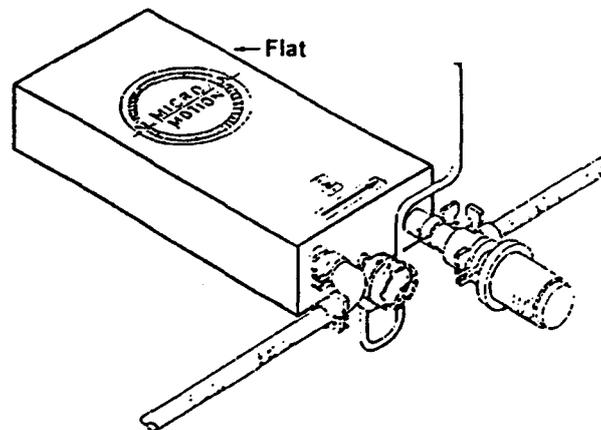
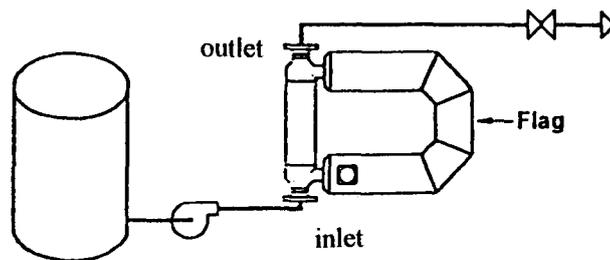


รูปที่ 45 ลักษณะการติดตั้งหน่วยวัดสำหรับใช้วัดอัตราการไหลมวลของก๊าซหรือทั้งสารแขวนลอย (Tube Up Position)

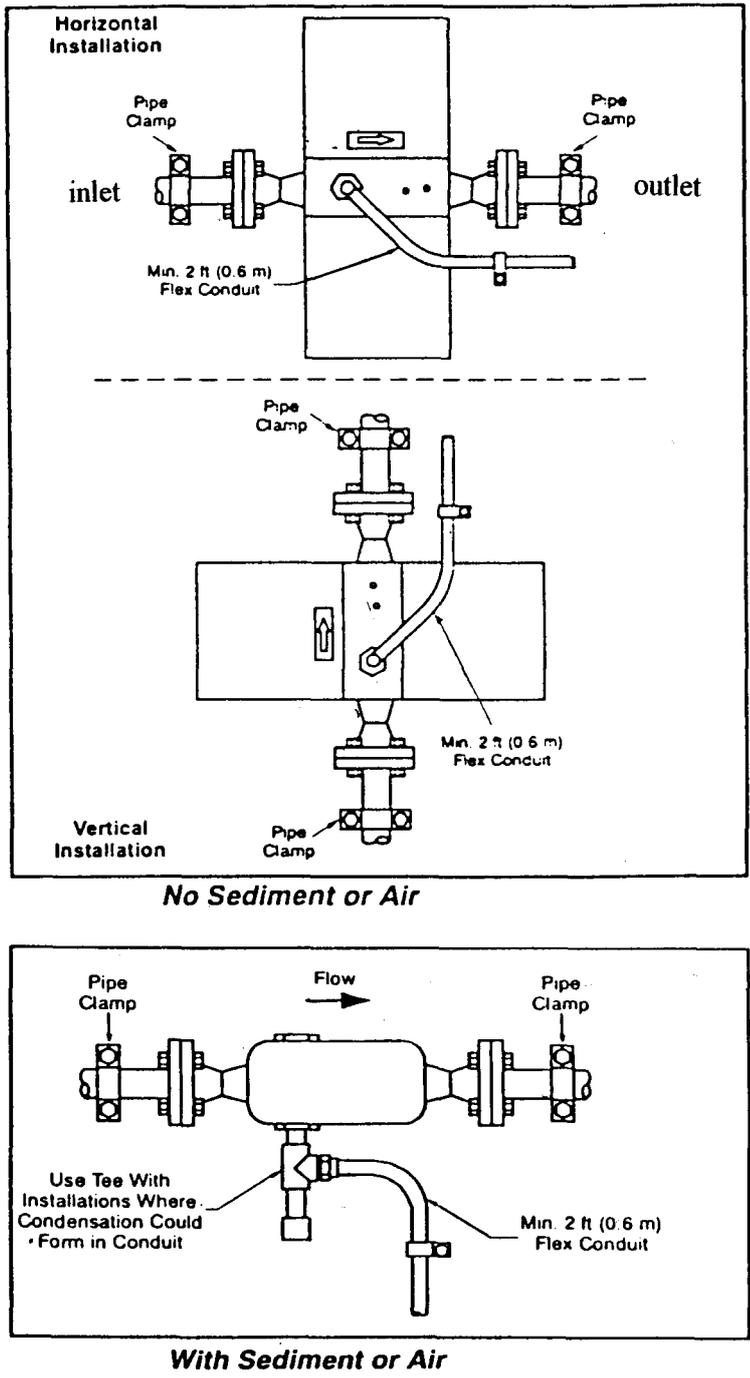


รูปที่ 46 ลักษณะการติดตั้งหน่วยวัดสำหรับใช้วัดอัตราการไหลมวลของของเหลว (Tube Down Position)

สำหรับการวัดก๊าซหรือไอ ทิศทางการติดตั้งมาตรวัดก็ควรอยู่ในลักษณะที่ไม่ทำให้ของเหลวควบแน่นหรือของเหลวซึ่งหลุดเข้ามาในระบบการวัดติดตั้งค้างอยู่ภายในท่อวัด (ดูรูปที่ 47) ทั้งนี้อาจจำเป็นต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์เสริม เช่นตัวดักจับของเหลว (liquid traps) ด้านก่อนทางเข้ามาตรวัดมวลคอรีออลิส



รูปที่ 47 ลักษณะการติดตั้งหน่วยวัดสำหรับใช้วัดอัตราการไหลมวลของของเหลวหรือก๊าซ ซึ่งต้องการท่อระบายออกจากหน่วยวัด (Tube Flat Position)

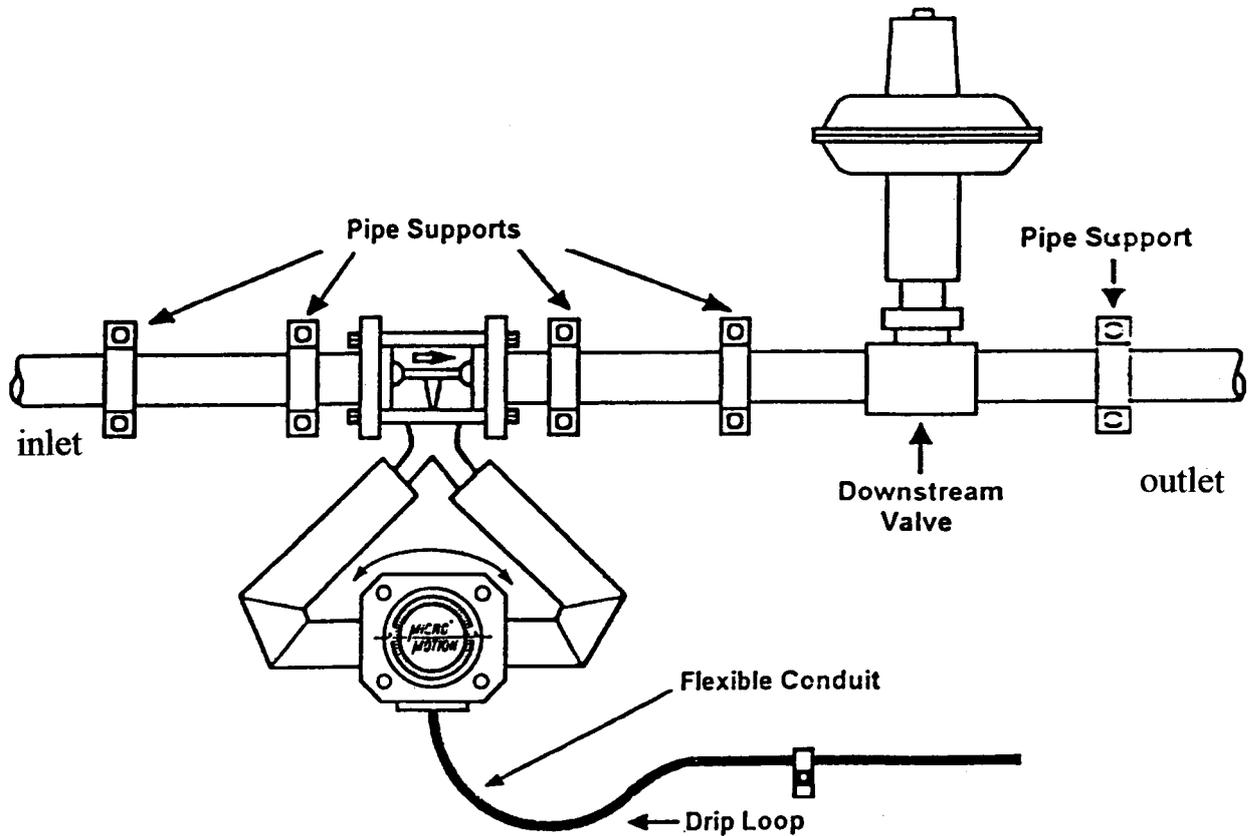


รูปที่ 48 รูปแบบลักษณะการติดตั้งอีกลักษณะหนึ่งของ Smith Meter Inc.

**หมายเหตุ** ในการติดตั้งมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) เพื่อทำการวัดของเหลว นั้นไม่ควรทำการติดตั้งท่อวัด

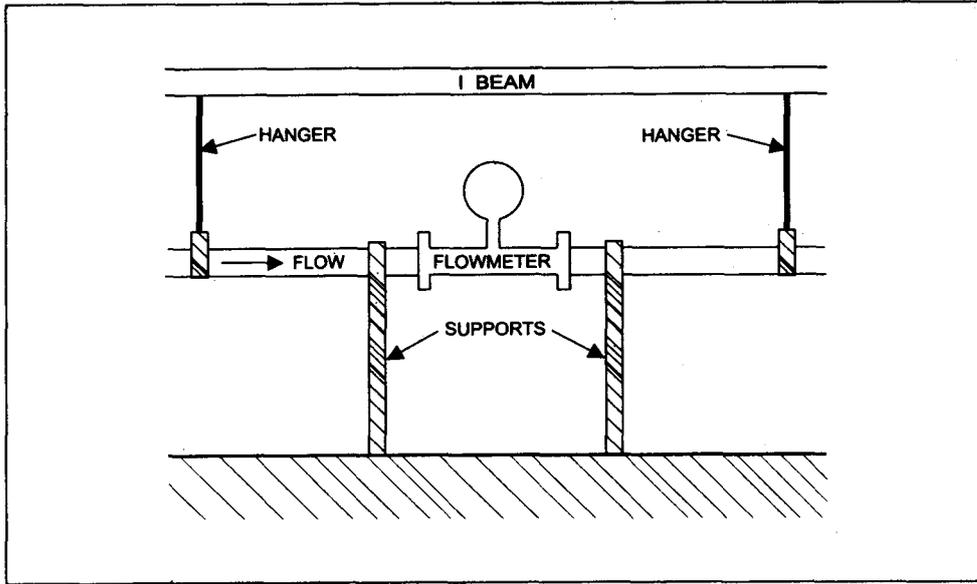
- ในตำแหน่งจุดสูงสุดของระบบท่อ
- ในตำแหน่งซึ่งอาจเกิดกาลักน้ำออกจากท่อวัด
- ในทิศทางที่ก่อให้เกิดกับดักก๊าซภายในท่อวัด

2. โครงสร้างรองรับการติดตั้ง (Pipe supports) การสั่นที่เกิดขึ้นในระบบท่อปกตินั้นจะไม่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) แต่อย่างใด การติดตั้งโครงสร้างรองรับการติดตั้งมาตรวัดมวลที่ดี ควรมีการติดตั้งทั้งด้านก่อนทางเข้ามาตรวัด และด้านหลังทางออกของมาตรวัดอย่างเพียงพอและเหมาะสม (ดูรูปที่ 49 และ 50) แต่ไม่ควรติดตั้งโครงสร้างรองรับ (pipe supports) กับตัวมาตรวัดมวลอย่างเด็ดขาด ให้ติดตั้งกับท่อก่อนและหลังทางเข้ามาตรวัดมวล ทั้งนี้เพื่อให้ระบบท่อก่อนและหลังทางเข้าทำหน้าที่รองรับมาตรวัดมวลแทนที่ให้มาตรวัดมวลรองรับระบบท่อ อีกทั้งควรทำการติดตั้งโครงสร้างรองรับให้ได้อยู่ในระนาบเดียวกัน เพื่อหากมีการเคลื่อนที่ของโครงสร้างรองรับไม่ว่าเกิดจากกรณีใดๆ ก็จะไม่สร้างหรือก่อให้เกิดความเครียด (stress) กับระบบท่อซึ่งจะส่งผลมายังหน่วยวัด (sensor unit) ของมาตรวัดมวลได้



Recommended Sensor Installation in Process Piping

รูปที่ 49 ข้อเสนอแนะการติดตั้งหน่วยวัดให้มีโครงสร้างรองรับ ในตำแหน่งที่เหมาะสม



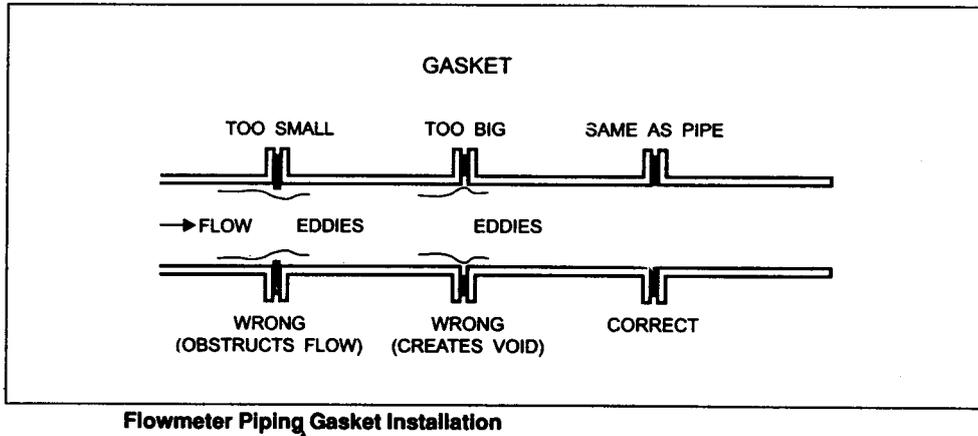
Flowmeter Piping Supports

**รูปที่ 50** ข้อเสนอแนะการติดตั้งหน่วยวัด หากต้องการตัว  
แขวนเพื่อลดการสั่นของท่อวัดขณะทำงาน

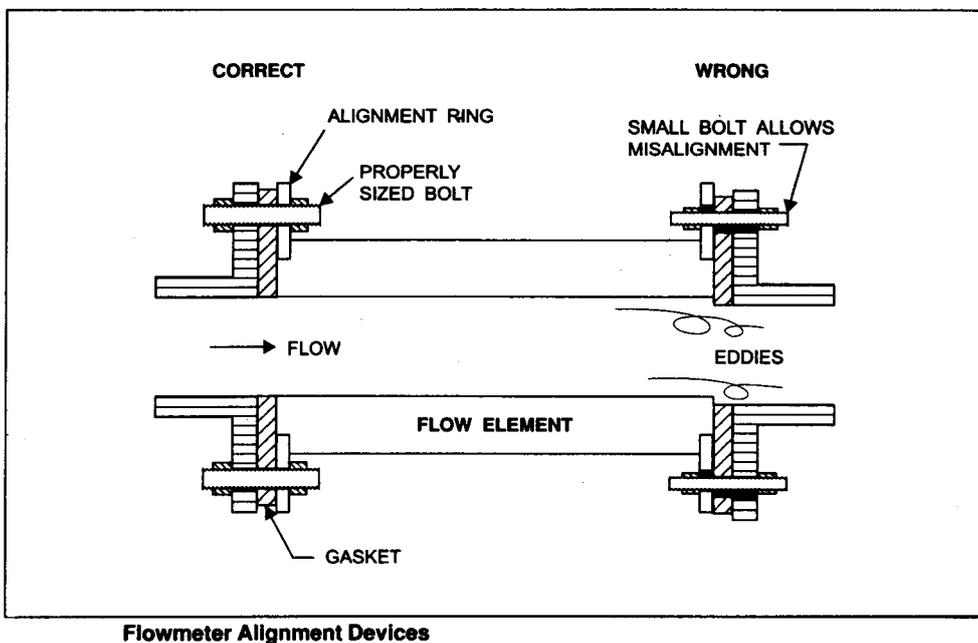
ในบางกรณีที่มีการเดินระบบท่อลัด (bypass loop) คร่อมมาตรวัดเพื่อสามารถถอดมาตรวัดไปซ่อมได้ในขณะที่ระบบทั้งหมดยังทำงานอยู่ ต้องมั่นใจว่าของวาล์วปิดเปิดของระบบท่อลัดและระบบท่อลัดถูกติดตั้งในตำแหน่งที่น้ำหนักไม่ไปเพิ่มภาระกับหน่วยวัดของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) แต่อย่างใด

การประกอบหน่วยวัดของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) กับระบบท่อให้ได้แนว (alignment) ที่ดียิ่งช่วยลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้เช่น ความเครียดบริเวณหน้าแปลนต่อเชื่อม การรั่วของของเหลวบริเวณหน้าแปลน ตลอดจนอาจก่อให้เกิดการไหลที่ปั่นป่วนบริเวณทางเข้ามาตรวัด (ดูรูปที่ 51 และ 52) ซึ่งอาจทำให้มีการไหลแบบ 2 สถานะ (two-phase liquid) เกิดขึ้นภายในท่อวัด นอกจากนี้ผู้ผลิตอาจกำหนดแรงตึงการขันน็อตของหน้าแปลนให้เหมาะสมด้วยเช่นกัน และถ้าหากมาตรวัดถูกใช้กับการวัดซึ่งมีอุณหภูมิขณะทำงานสูงกว่าหรือต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเกินกว่า 25 °C ให้ทำการตรวจสอบการขันน็อตบริเวณหน้าแปลนอีกครั้งหลังจากมาตรวัดทำงานที่อุณหภูมิ ณ สภาวะทำงานจริง (operating temperature) เพื่อป้องกันการรั่วไหลของของเหลวบริเวณรอยต่อหน้าแปลนได้ สำหรับหน่วยวัด (sensor unit) ของผู้ผลิตบางรายได้มีการเคลือบสารอยู่ภายใน ดังนั้นจำเป็นต้องดูแลและเอาใจใส่ให้มากในเรื่องของขนาดของแรงในการขันน็อตเพราะหากขันน็อตด้วยทอร์กสูงเกินไปอาจทำให้สารเคลือบหลุดร่อนได้

หน่วยวัดของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) บางชนิดก็ไม่ต้องการโครงสร้างรองรับการติดตั้งแต่อย่างใด ดังนั้นเมื่อทำการติดตั้งมาตรวัดมวลดังกล่าวจำเป็นต้องปฏิบัติตามผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด ซึ่งมักจะพบเป็นมาตรวัดมวลขนาดเล็กสามารถวัดอัตราการไหลมวลประมาณ 2 lb/min ดังนั้นการเอาใจใส่ในการติดตั้งจึงมีความจำเป็นและสำคัญ



รูปที่ 51 การติดตั้งปะเก็นหน้าแปลนที่ไม่ถูกต้อง จะมีผลต่อความแม่นยำในการวัด



รูปที่ 52 การประกอบหน้าแปลนที่เอียงศูนย์กลาง จะมีผลต่อความแม่นยำในการวัด

3. วาล์วด้านทางออกมาตรวัด (Downstream valve) จะเห็นได้ว่าการที่จะให้มาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis mass flowmeter) ทำงานด้วยความแม่นยำสูงตลอดช่วงการวัดได้ โดยเฉพาะช่วงอัตราการไหลต่ำๆ นั้นเราจำเป็นต้องทำการปรับศูนย์ (zero adjustment) เพื่อให้ค่าผิดพลาดศูนย์ (zero error) มีค่าน้อยที่สุดหลังจากทำการติดตั้งเสร็จ ดังนั้นต้องมั่นใจได้ว่าสามารถปิดกั้นของเหลวค้างอยู่ในท่อวัดและไม่ให้ไหลออกจากมาตรวัดวาล์วด้านทางออกจากมาตรวัดมวลคอริโอลิสขณะทำการปรับศูนย์

ในกรณีที่ต้องทำการวัดอัตราการไหลสำหรับจ่ายของเหลวออกจากถังเก็บนั้น ควรทำการติดตั้งหน่วยวัดและวาล์วควบคุม (control valve) ให้ใกล้กับจุดรับ เช่นถังรับ ให้มากที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดค่าผิดพลาดมากเกินไป อีกทั้งไม่ควรติดตั้งท่ออ่อน (flexible hose) ระหว่างหน่วยวัดกับวาล์วควบคุมเนื่องจากท่ออ่อนอาจมีการขยายตัวหรือหดตัวได้เมื่อความดันเปลี่ยนแปลงขณะมาตรวัดทำงาน

หากจำเป็นต้องใช้มาตรวัดทำการวัดเพื่อรับผลิตภัณฑ์เข้าถัง ต้องทำการติดตั้งวาล์วกันกลับ (check valve) บริเวณด้านทางออกหน่วยวัดเพื่อป้องกันไม่ให้นำมาตรวัดวัดปริมาณของเหลวซ้ำอีกครั้งได้

4. การเดินสายไฟกำลังและสายสัญญาณ (wiring) ผู้ผลิตมาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis mass flowmeter) ส่วนใหญ่จะจัดให้มีส่วนของตัวถ่ายทอดสัญญาณ (transmitters) เพื่อสามารถส่งสัญญาณไปยังห้องควบคุมซึ่งอยู่ห่างออกไปจากตำแหน่งซึ่งติดตั้งหน่วยวัด (sensor unit) ทำให้เราสามารถติดตั้งท่อวัดโดยที่ตัวส่งสัญญาณไม่ต้องอยู่ที่สภาวะแวดล้อมทำงานจริง นอกจากนี้จะต้องการต่อสายกราวด์ และป้องกันสายส่งสัญญาณต่างๆซึ่งถูกส่งมาจากหน่วยวัด (sensor unit)

ปัญหาอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญอย่างยิ่งที่ต้องพึงระมัดระวังก็คือ การรบกวนสัญญาณเนื่องจาก Electromagnetic Interference (EMI) กระทำต่อสายส่งสัญญาณหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis mass flowmeter) ดังนั้นในบางบริษัทผู้ผลิตจะแนะนำให้ทำการติดตั้งหน่วยวัด (sensor unit) ห่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าหรือมอเตอร์ไฟฟ้าอย่างน้อย 60 เซนติเมตร อีกทั้งไม่ควรเดินสายไฟกำลังร่วมอยู่ในท่อร้อยสายเดียวกับสายสัญญาณ รวมทั้งไม่ควรเดินสายสัญญาณคร่อมแหล่งที่อาจกำเนิดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เช่น มอเตอร์

5. การเดินท่อก่อนและหลังทางเข้ามาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ส่วนใหญ่ผู้ผลิตมาตรวัดมวลชนิดนี้ ไม่ได้กำหนดให้ลักษณะการเดินท่อทั้งก่อนและหลังทางเข้ามาตรวัดเหมือนอย่างเช่นมาตรวัดชนิดอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามก็มีบางบริษัทที่กำหนดให้ท่อก่อนทางเข้าและหลังออกจากมาตรวัดมวลต้องเป็นท่อตรงอย่างน้อย 30 เท่าของขนาดท่อ ซึ่งทำการติดตั้งมาตรวัดมวล

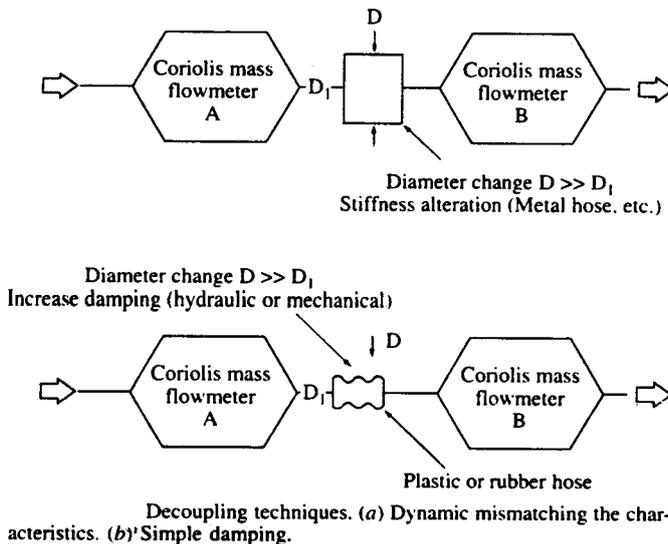
6. การวัดอัตราการไหลมวลของก๊าซ (Gas flow application) เนื่องจากความหนาแน่นของก๊าซมีค่าต่ำมาก แต่ขนาดของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ซึ่งใช้กับการวัดการไหลของก๊าซมีขนาดในช่วง 1 นิ้ว จนถึง 4 นิ้วเท่านั้น ดังนั้นเพื่อลดความดันตกคร่อมตัวมาตรวัดมวลให้น้อยลงมากที่สุด การเดินท่อโดยการใช้ท่อลดทอขยาย (reducers) เพื่อเปลี่ยนแปลงขนาดระบบท่อก่อนเข้าและออกจากมาตรวัดต้องระมัดระวังเป็นพิเศษไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงความดันที่รวดเร็วเกินไป

7. ข้อคำนึงในกรณีที่ทำกรติดตั้งพิเศษ (special application considerations) หากจำเป็นต้องทำการติดตั้งมาตรวัดมวลซึ่งต้องทำการวัดของเหลวที่มีอุณหภูมิร้อนมากๆ หรือเย็นมากๆ ต้องดำเนินการติดตั้งตามข้อแนะนำจากผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด เนื่องจากมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ส่วนใหญ่จะทำการติดตั้งหน่วยวัด (sensor unit) อยู่ในตัวเรือนที่มิดชิด ดังนั้นต้องมีมาตรการที่จะป้องกันความแตกต่างของความดันระหว่างภายในตัวเรือนของหน่วยวัดกับบรรยากาศภายนอกเมื่อใช้มาตรวัดกับของเหลวซึ่งมีอุณหภูมิร้อนมากๆ หรือเย็นมากๆ หากใช้วัดของเหลวมีอุณหภูมิสูงๆ ต้องมีวิธีการที่จะระบายความดันออกจากตัวเรือน (casing) ของหน่วยวัด ในขณะที่เดียวกันหากใช้วัดของเหลวมีอุณหภูมิต่ำมากๆ เช่นการวัดก๊าซไนโตรเจนเหลว หรือระบบ cryogenics ต้องมีวิธีการที่จะอัดความดันเข้าตัวเรือน (casing) ของหน่วยวัดอันเนื่องจากอากาศภายในมีการหดตัว โดยการใช้ก๊าซไนโตรเจนซึ่งดีกว่าและปลอดภัยกว่าการใช้อากาศ เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยส่งผลให้ช่วยป้องกันการระเบิดหรือเป็นสาเหตุก่อให้เกิดไฟไหม้ได้ อีกทั้งเป็นการป้องกันการควบแน่นของอากาศและการแข็งตัวของน้ำภายในตัวเรือนอีกด้วย

ในกรณีที่เกิดปรากฏการณ์ “Flashing” เมื่อของเหลวไหลผ่านมาตรวัดซึ่งมีความดันตกคร่อมสูง ดังนั้นเมื่อของเหลวไหลผ่านมาตรวัดของเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วจากความดันสูงสู่ความดันต่ำทำให้ของเหลวเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอบางส่วน หรือในกรณีที่ทำการติดตั้งแล้วอาจมีแนวโน้มเกิดปรากฏการณ์ cavitation (ความดันไอของเหลวมีค่าสูงกว่าความดันภายในท่อวัด) เนื่องจากความดันย้อนกลับ (back

pressure) ไม่เพียงพอส่งผลให้การวัดอัตราการไหลมวลของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis mass flowmeter) มีค่าผิดพลาดสูง และให้ค่าผลการวัดไม่เสถียรภาพเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน อีกทั้งจะเพิ่มระดับความผิดพลาดสูงมากขึ้นเมื่อมีอัตราการไหลสูงมากขึ้น วิธีแก้ปัญหาดังกล่าวกระทำโดยเปลี่ยนแปลงขนาดของมาตรวัดให้ใหญ่ขึ้นเพื่อลดความดันตกคร่อมมาตรวัดให้เหลือน้อยลงมากเท่าที่จะกระทำได้ และทำการติดตั้งวาล์วเพิ่มความดันย้อนกลับ (backpressure valve) ด้านทางออกมาตรวัดเพื่อลดการเกิด cavitation แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆร่วมประกอบด้วย

ในบางกรณีซึ่งมีการติดตั้งมาตรวัดต่อเรียงกันแบบอนุกรม อาจด้วยวัตถุประสงค์เพื่อทำการตรวจสอบการรั่วไหล (leak detection) หรือเพื่อตรวจสอบการทำงานของมาตรวัดเข้าหรือติดตั้งมาตรวัดอยู่บนโครงสร้างรองรับโครงสร้างเดียวกัน มาตรวัดอาจมีอาการที่เรียกว่า "cross-talk" นั่นคือ อาการที่มาตรวัดตัวหนึ่งได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนของมาตรวัดอีกตัวหนึ่ง หากเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจะส่งผลให้เราไม่สามารถทำการปรับศูนย์มาตรวัดมวลได้ที่สภาวะไม่มีการไหลของของเหลวผ่านมาตรวัด ด้วยเหตุนี้มีหลายบริษัทผู้ผลิตกำหนดให้ระยะห่างของการติดตั้งระหว่างมาตรวัดมวลคอริโอลิสด้วยกันต้องห่างกันอย่างน้อยเท่ากับ 20 ถึง 30 เท่าของขนาดท่อซึ่งมาตรวัดมวลคอริโอลิสติดตั้งอยู่เมื่อต้องการติดตั้งมาตรวัดแบบอนุกรม อีกทั้งต้องทำการแยกโครงสร้างของส่วนรองรับมาตรวัด (pipe support) ให้อิสระจากกันหากมาตรวัดถูกติดตั้งอยู่บนโครงสร้างเดียวกัน นอกจากนี้อาจมีอุปกรณ์เสริมต่างๆที่เหมาะสมเพื่อทำการแยกมาตรวัดไม่ให้มีการส่งถ่ายการสั่นถึงกันได้ โดยทำการพิจารณาเป็นเหตุการณ์ไป หรืออาจใช้เทคนิค decoupling ดังรูปเพื่อช่วยลดเหตุการณ์ "cross-talk"



หากเราพอสรุปได้ว่ามาตรวัดมวลคอริออริส (coriolis mass flowmeter) จะสามารถทำการวัดอัตราการไหลมวลได้ด้วยความถูกต้องและแม่นยำต่อเมื่อ

- ของเหลวภายในท่อวัดยังคงมีสถานะเดียวคือสถานะของเหลวตลอดช่วงระยะเวลาทำการวัด หรือเรียกว่า single phase นั่นคือของเหลวต้องไม่กลายเป็นไอซึ่งจะทำให้เกิดการไหลของเหลวเป็น 2 สถานะอยู่ภายในท่อวัด ซึ่งเรียกว่า two-phase flow
- การสั่นจากแหล่งกำเนิดภายนอกไม่สามารถส่งผ่านถึงหน่วยวัด (sensor unit) ได้
- การรบกวนสัญญาณเนื่องจาก Electromagnetic Interference (EMI) ไม่เกินขีดความสามารถของการป้องกันสัญญาณของสายสัญญาณหรือของอุปกรณ์ของมาตรวัดมวลคอริออริส (coriolis mass flowmeter)

### **ปัจจัยที่มีผลต่อมาตรวัดมวลคอริออริส (Influence Quantities on Coriolis Mass Flowmeters) ได้แก่**

ความล้า (Fatigue) ซึ่งจะก่อปัญหาของการกัดกร่อนอันเนื่องจากความเครียด (stress)

คุณสมบัติของของเหลว (Fluid properties) ความหนาแน่น ความหนืด การมีอากาศหรือก๊าซผสมกับของเหลวที่ต้องการวัด หรือการที่ของเหลวมีสารแขวนลอยผสมอยู่ก็ล้วนแต่มีอิทธิพลต่อการทำงานของมาตรวัดทั้งสิ้น โดยหากของเหลวมีสารแขวนลอยผสมอยู่และสารแขวนลอยเป็นอนุภาคที่มีคุณสมบัติแข็งพอที่ก่อให้เกิดรอยขีดขูดภายในท่อวัด ความเร็วของเหลวมากที่สุดที่ยอมให้ไหลผ่านท่อวัดของมาตรวัดได้ต้องไม่เกินกว่า 2 m/s (6 ft/s)

การติดตั้งมาตรวัด ต้องอยู่ในทิศทางที่ไม่เป็นสาเหตุทำให้อากาศหรือก๊าซถูกดักอยู่ภายในท่อวัด หรือต้องไม่ให้ความดันสูญเสียตกคร่อมมาตรวัดสูงมากจนเกินไปซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์ cavitation ภายในท่อวัดได้

การแทรกซ้อนของการทำงานมาตรวัดด้วยกัน ในกรณีที่ต้องทำการติดตั้งมาตรวัดเป็นอนุกรม อาจก่อให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดของมาตรวัดได้ ซึ่งอาจแก้ไขปัญหานั้นได้โดยทำการติดตั้งข้อต่อ (coupling) ดังรูป d)

การรักษาเสถียรภาพของการแสดงค่าศูนย์ (Zero stability) ความดันและอุณหภูมิของของเหลวมีผลต่อการรักษาเสถียรภาพของการแสดงค่าศูนย์ ดังรูป e), f), และ g)

**TABLE** Influence Quantities on Coriolis Mass Flowmeters

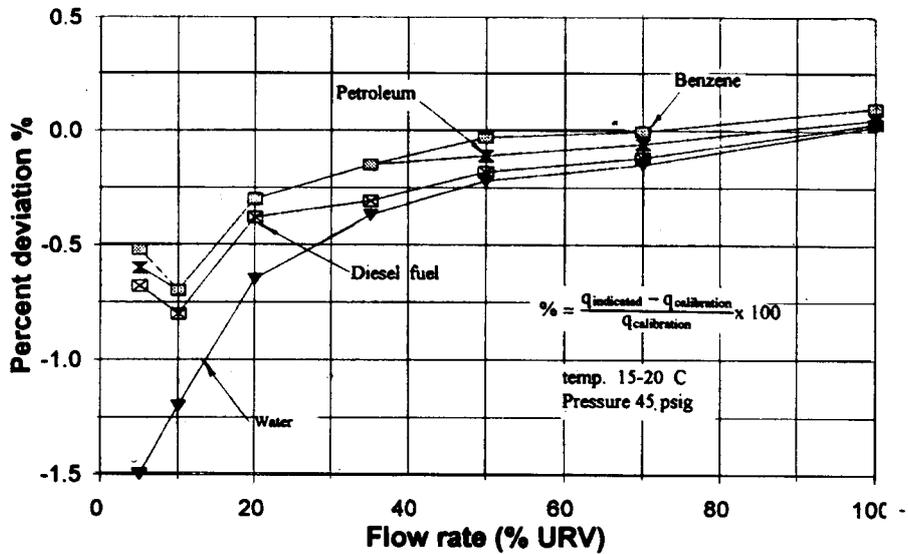
**Fatigue**

Stress corrosion cracking, pitting, and intergranular stress corrosion may occur in some designs, particularly if free halogens are present.

**Fluid properties**

Density/viscosity sensitivity

รูป a.)

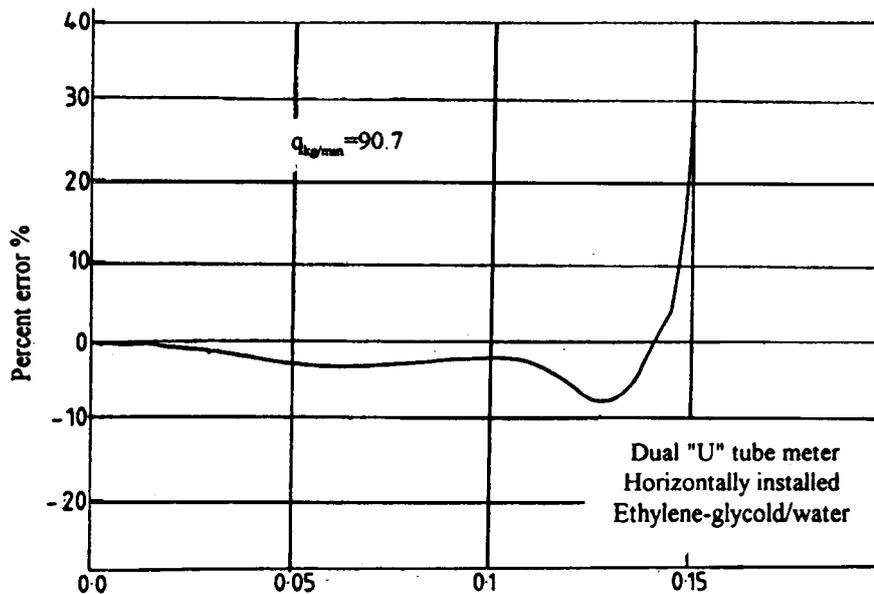


รูป a.) อิทธิพลของความหนาแน่น / ความหนืดต่อมาตรฐานวัดมวลคอริโอลิส

Multicomponent flows, with abrasive particles; maximum velocity through the tubes should be 6 ft/s (2m/s).

Void fraction effect

รูป b.)



$$\text{Void fraction} = \frac{\text{air volumetric flow rate}}{\text{liquid volumetric flow rate} + \text{air volumetric flow rate}}$$

Figure Effect of two-component flow on a Coriolis mass flowmeter.

รูป b.) อิทธิพลของการไหลแบบ 2 สภาวะ (อากาศ+ของเหลว) ต่อมาตรฐานวัดมวลคอริโอลิส

Bubbly flow effect

รูป ค.)

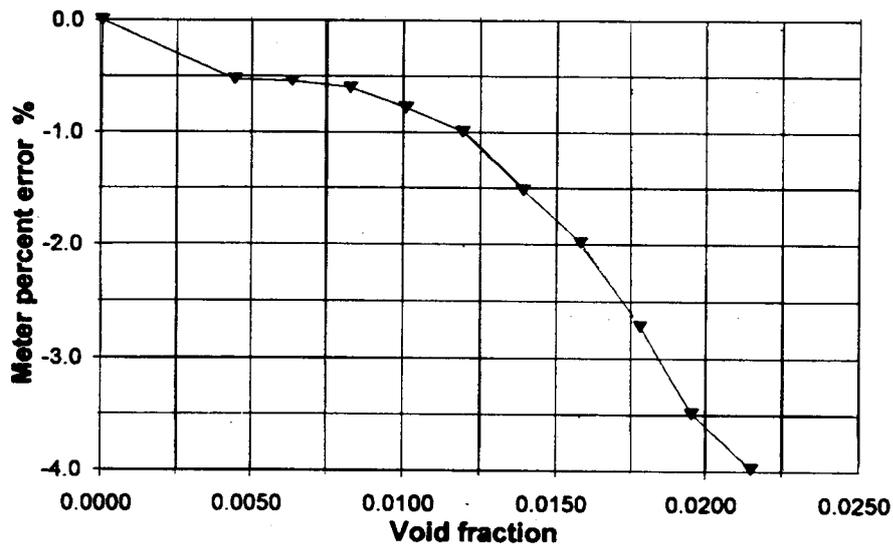


Figure Effect of bubbly flow on a Coriolis mass flowmeter.

รูป ค.) อิทธิพลของการไหลที่มีฟองต่อมาตรวัดมวลคอริโอลิส

Installation

Vertical installation preferred in order to self-purge gas (vapor) for horizontal equalize potential gas (vapor) bubbles by installation. Some meters' high-pressure loss may lead to cavitation.

Mutual interference

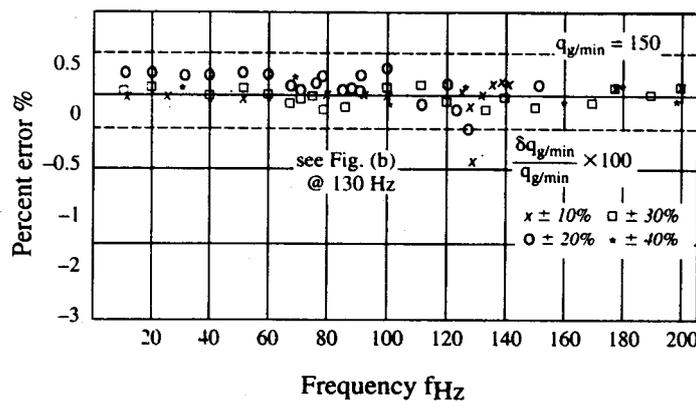
Meters installed in series may experience mutual interference resulting in error. Reduce this effect by decoupling methods shown in Fig. 14.32a, b or by tuning the dynamic characteristic of the transducers by simply shifting the compliance modal mass of one of the transducers.

Pulsation

Significant errors will occur if pulsation frequency at vibratory frequency is characterized by audible knocking noises.

Typical effects

รูป ด.)



(a)

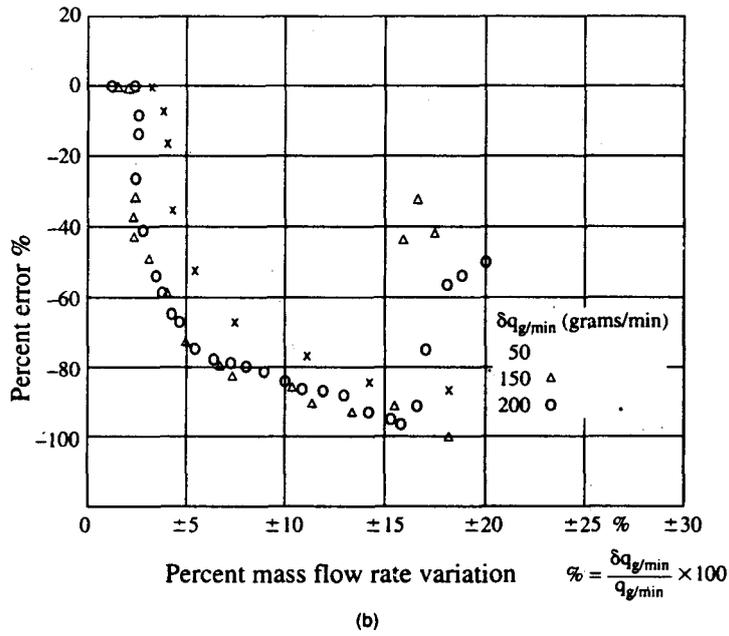


Figure Pulsating flow effect on a "U" tube Coriolis mass flowmeter. (a) Normal. (b) At 130 Hz.

รูป d.) อิทธิพลของการไหลเป็นจังหวะ (pulsating flow) ต่อมาตรวัดมวลคอริโอลิส

Vibration sensitivity

Sensitive to inadequate supporting which has a natural frequency within 20% of the operating frequency.

Zero stability

Effect of zero

รูป e.)

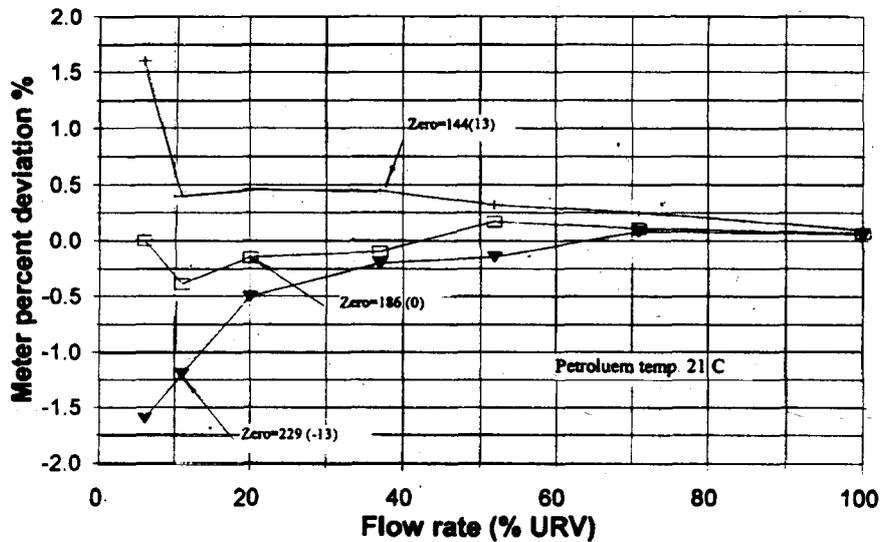


Figure Effect of zero on the calibration curve for a Coriolis mass flowmeter.

รูป e.) อิทธิพลของการตั้งศูนย์ของมาตรวัดมวลคอริโอลิส

Pressure effect general + zero error

รูป f.)

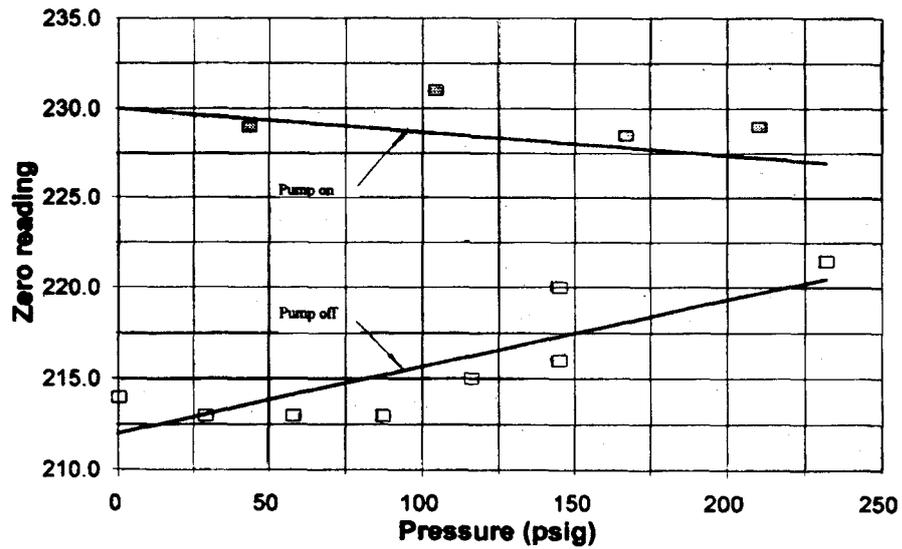


Figure Effect of pressure of the zero of a Coriolis mass flowmeter.

รูป f.) อิทธิพลของความดันต่อการแสดงค่าศูนย์ของมาตรวัดมวลคอริโอลิส

Temperature increase – zero effect

รูป g.)

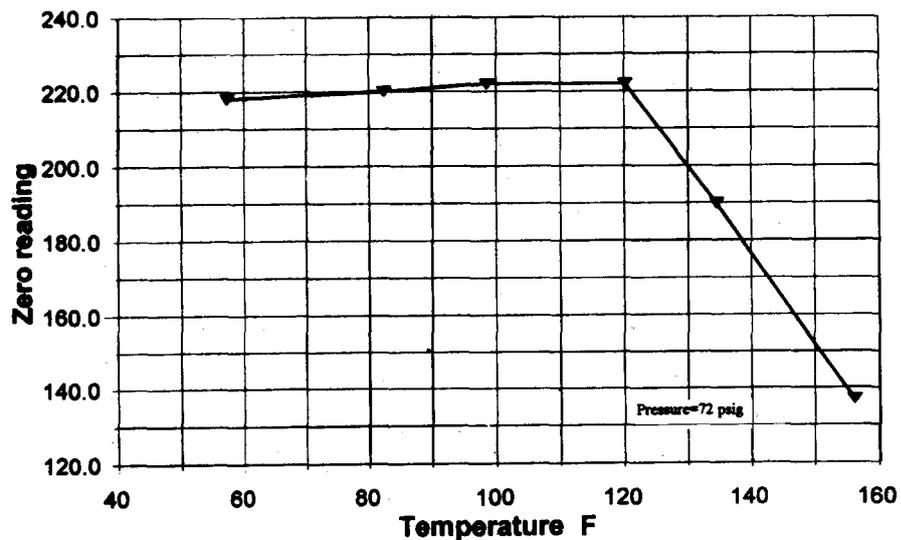


Figure Effect of temperature on the zero of a Coriolis mass flowmeter.

รูป g.) อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการแสดงค่าศูนย์ของมาตรวัดมวลคอริโอลิส

Sources: Baker (1994), Birker (1989), Frankvoort (1989), Grumski et al. (1984), Hemp et al. (1989), ISO 10790 (1994), Kiel (1991), Wagner (1988).

## การบำรุงรักษา (Maintenance)

ข้อดีที่สำคัญอย่างหนึ่งของมาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis mass flowmeter) ได้แก่ความต้องการดูแลเอาใจใส่บำรุงรักษาน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากมาตรวัดชนิดดังกล่าวนี้มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวน้อยมาก ด้วยสาเหตุนี้จึงมักเป็นเหตุผลสำคัญในการตัดสินใจเลือกใช้มาตรวัดชนิดนี้ หากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่ต้องเกิดขึ้นเมื่อจำเป็นต้องใช้มาตรวัด

**การตรวจสอบตัวถ่ายทอดสัญญาณ (Transmitter)** เนื่องจากตัวถ่ายทอดสัญญาณเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งของระบบการวัดมวล ดังนั้นจำเป็นต้องทำการตรวจสอบอย่างเต็มรูปแบบ อย่างน้อยปีละ 2 ครั้ง โดยทำการตรวจเช็คตามคำแนะนำจากผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด อีกทั้งควรกระทำหลายๆจุด ในส่วนการจำลองสัญญาณที่เหมาะสมอย่างไรหรือควรใช้เครื่องมือประเภทใดนั้น ควรปรึกษาผู้ผลิตด้วยความรอบคอบ แต่ต้องระลึกดีว่าการตรวจสอบการทำงานของตัวถ่ายทอดสัญญาณไม่ใช่เป็นการทดแทนการสอบเทียบ (calibration) มาตรวัดมวล เพราะการสอบเทียบมาตรวัดเป็นการตรวจเช็คการทำงานร่วมกันของทั้งตัวถ่ายทอดสัญญาณและหน่วยวัด (measuring unit)

การสอบเทียบมาตรวัดโดยทั่วไปนั้นกระทำตามข้อกำหนดของผู้ผลิตหรือมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงของสากล ซึ่งต้องให้มาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis mass flowmeter) ทำงานจริงโดยทำการสอบเทียบกับแบบมาตราที่นำเชื่อถือ แนะนำให้ทำการสอบเทียบด้วยวิธีการนี้ เนื่องจากเป็นการทดสอบมาตรวัดภายใต้สภาวะการทำงานจริงๆของมาตรวัดซึ่งจะให้ผลการสอบเทียบที่แม่นยำสูง แต่ถ้าหากไม่สามารถทำการสอบเทียบด้วยวิธีการดังกล่าวได้จริง ก็พอที่ทำการตรวจเช็คระบบทางอิเล็กทรอนิกส์เพียงอย่างเดียวก็สามารถกระทำได้แต่ความน่าเชื่อถือไม่ดีนัก

ก่อนทำการติดตั้งควรพิจารณาก่อนว่าของเหลวที่ต้องวัดอัตราการไหลมวลนั้นมีผลต่อการทำงานหรือก่อให้เกิดการสึกกร่อนต่อมาตรวัดหรือไม่ วัสดุที่ใช้ทำท่อวัดเหมาะสมหรือไม่ นอกจากนี้ควรทำการตรวจสอบสภาพท่อวัด (measuring unit) ในเรื่องของความหนาของท่อวัด หรือ บริเวณผิวโลหะภายในท่อวัดว่าเป็นหลุมหรือไม่ หากทำการตรวจพบว่าความหนาของท่อวัดลดลงอย่างมากหรือผิวโลหะถูกกัดกร่อนเกิดเป็นหลุม (pitting) ให้ทำการเปลี่ยนชนิดวัสดุของท่อวัดเป็นวัสดุชนิดอื่นที่เหมาะสมทันที เนื่องจากไม่เพียงแต่ทำให้มาตรวัดสูญเสียความแม่นยำในการวัดแล้วยังทำให้อายุการใช้งานมาตรวัดสั้นลงด้วย



# บทที่ 5

## การสอบเทียบ

### (Calibration Methods)

เนื่องจากมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ปลอดภัยจากการได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆของของเหลว เช่น ความหนาแน่น , ความหนืด , อุณหภูมิ , ความดัน และปัญหาการสอบเทียบมาตรวัดด้วยของเหลวชนิดหนึ่งแต่นำไปใช้วัดของเหลวอีกชนิดหนึ่งไม่ได้ มาตรวัดมวลชนิดนี้จึงนับได้ว่ามีความยืดหยุ่นต่อการใช้งานได้สูงมากทีเดียว

ในการสอบเทียบมาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ยังนับได้ว่ายังมีปัญหากันอยู่บ้างว่าวิธีใดจะเหมาะสมที่สุด ก็ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ผลิต , ผู้ประกอบการ , หรือ surveyors ซึ่งทำหน้าที่ให้บริการสอบเทียบ (calibration) หรือหน่วยงานของรัฐ เราพอพิจารณาการสอบเทียบด้วยกัน 2 แบบใหญ่ได้แก่

#### **การสอบเทียบแบบแห้ง (a dry calibration)**

โดยนำข้อมูลผลการสอบเทียบจากบริษัทผู้ผลิตมากำหนดไว้กับมาตรวัด พร้อมทำการปรับศูนย์ (zero setting) ด้วยของเหลวซึ่งต้องการวัดที่อุณหภูมิทำงานจริงภายใต้สภาวะไม่มีการไหล เมื่อทำการป้อนข้อมูลซึ่งได้มาจากบริษัทผู้ผลิตพร้อมทำการปรับศูนย์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็สามารถทำการวัดอัตราการไหลมวลได้ โดยนำผลจากการวัดได้ด้วยมาตรวัดมวลเปรียบเทียบกับการชั่งน้ำหนัก เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลซึ่งถูกป้อนเข้าไปให้ผลการวัดแม่นยำหรือไม่ก่อนดำเนินการใช้งานจริง นอกจากนี้อาจกระทำการตรวจสอบความแม่นยำการวัดที่อัตราการไหลต่างๆเพื่อตรวจสอบความแม่นยำด้วยเช่นกัน

#### **การสอบเทียบแบบเปียก (a wet calibration)**

วิธีการที่ถูกต้องและสะดวกที่สุดในการสอบเทียบ (calibration) มาตรวัดมวลคือ เทคนิควิธีการชั่งน้ำหนัก ( gravimetric proving techniques) ที่นิยมและปลอดภัยได้แก่การใช้น้ำแทน

ของเหลวซึ่งต้องการวัดจริงๆในระบบ ทำการชั่งน้ำหนักสำหรับการไหลแต่ละปริมาณเท่าๆกัน แต่ก็มีวิธีการสอบเทียบอื่นๆขึ้นอยู่กับสถานที่ อุปกรณ์เครื่องมือ, แบบมาตรา หรือการทำงานที่สามารถทำการสอบเทียบ ณ ขณะนั้นๆ

1. **มาตรวัดแบบมาตรา (Master meter system)** ผู้ที่ต้องการทำการสอบเทียบ (calibration) มาตรวัดมวลคอริโอลิส (coriolis mass flowmeter) ต้องมีมาตรวัดแบบมาตรา (master meter) ซึ่งได้รับการสอบเทียบจากหน่วยงานที่น่าเชื่อถือพร้อมใบรายงานผลการตรวจสอบและสอบเทียบว่าได้ถูกต้องมีความแม่นยำสูงระดับหนึ่ง จากนั้นนำไปต่ออนุกรมกับมาตรวัดมวลที่ต้องการสอบเทียบ ทำการสอบเทียบที่อัตราการไหลที่แตกต่างกันๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการวัดมาตรวัดแบบมาตรา ข้อดีวิธีการสอบเทียบวิธีนี้สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และสามารถสอบเทียบที่อัตราการไหลแตกต่างกันด้วยจำนวนรอบการสอบเทียบหลายครั้งในระยะเวลาอันสั้น ในกรณีที่ต้องการสอบเทียบ (calibration) มาตรวัดมวลซึ่งมีขนาดและอัตราการไหลที่แตกต่างกันหลากหลาย จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนขนาดมาตรวัดแบบมาตราด้วยเช่นกัน

2. **การชั่งน้ำหนักสอบเทียบ (weighing calibration)** อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการสอบเทียบด้วยวิธีการนี้ได้แก่ ถังบรรจของเหลวพร้อมอุปกรณ์การชั่งน้ำหนัก ซึ่งเครื่องชั่งที่ใช้งานนี้ต้องได้รับการสอบเทียบจากตุนน้ำหนักที่ได้รับการสอบเทียบจากหน่วยงานของรัฐ หรือสถาบันที่น่าเชื่อถือเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็น ทั้งนี้เนื่องจากการสอบเทียบใดๆจะให้ความแม่นยำสูงเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับแบบมาตราที่ใช้ การสอบเทียบมาตรวัดมวลนี้ต้องระมัดระวังค่าผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากการค้างของของเหลวหลังจากไหลผ่านมาตรวัดที่อยู่ภายในท่อระหว่างมาตรวัดกับวาล์วปิด-เปิดหลังมาตรวัด (shutoff valve) ดังนั้นควรทำการติดตั้งวาล์วปิด-เปิดหลังมาตรวัดให้อยู่ใกล้กับถังบรรจของเหลวให้มากที่สุดเท่าที่กระทำได้

การสอบเทียบด้วยวิธีการนี้พอจะแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ

2.1 **Static Weighing** การชั่งน้ำหนักสอบเทียบสถิตด้วยวิธีการนี้ ปกติแล้วมักจะใช้น้ำสะอาดเป็นตัวกลางในการสอบเทียบ โดยจะมีวาล์วสำหรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำหลังจากผ่านการวัดด้วยมาตรวัดมวลคอริโอลิสให้ลงในถังซึ่งติดตั้งอยู่บนเครื่องชั่งเมื่อเริ่มทำการสอบเทียบ เมื่อได้น้ำหนักที่ต้องการสอบเทียบแล้ววาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหลก็จะเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำให้ไหลกลับลงถึงน้ำสำรอง (reservoir) จากนั้นทำการอ่านค่าน้ำหนักและแก้ไขค่าตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อน้ำและเครื่องชั่ง รวมทั้งแรงยกตัวขึ้นเนื่องจากอากาศ (buoyancy force) กระทำต่อน้ำ เมื่อได้น้ำหนักของน้ำหลังจากปรับแก้ไขค่าให้ถูกต้องแล้วนำมาหารด้วยช่วงเวลาตั้งแต่น้ำไหลลงถึงจนวาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำออกไปจาก

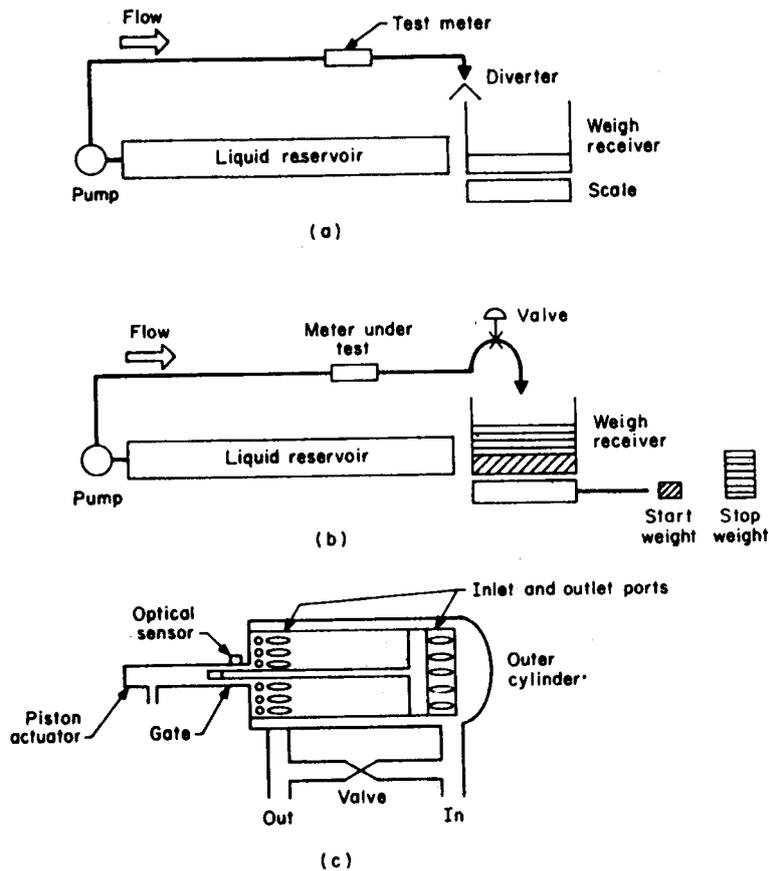
ถึง ก็จะได้อัตราการไหลมวล (true mass flow rate) จะเห็นได้ว่าการชั่งน้ำหนักสอบเทียบสถิต ด้วยวิธีการนี้ง่ายต่อการดำเนินการและให้ความถูกต้องแม่นยำสูงเนื่องจากการอ่านค่าต่างๆ อยู่ภายใต้สภาวะคงที่

**2.2 Dynamic Weighing** การชั่งน้ำหนักสอบเทียบด้วยวิธีการนี้ จำเป็นต้องควบคุมให้อัตราการไหลของของเหลวไหลผ่านมาตรวัดด้วยอัตราการไหลสม่ำเสมอคงที่ (steady flow-rate condition) ให้ไหลลงในถังซึ่งติดตั้งอยู่บนเครื่องชั่งเมื่อเริ่มทำการสอบเทียบ จนแน่ใจว่าคงที่จริงแล้วจึงทำการปิดวาล์วระบายน้ำออกจากถัง เมื่อมวลของเหลวเริ่มสะสมอยู่ในถังจนถึงค่าหนึ่งสวิทช์อัตโนมัติจะถูกกระตุ้นให้เริ่มนับเวลาและบันทึกค่าน้ำหนักที่อ่านได้ ณ เวลานั้นทันทีและถือเป็นน้ำหนักเริ่มต้น จนกระทั่งได้น้ำหนักที่ตั้งไว้ล่วงหน้าตามที่ต้องการในการสอบเทียบ สวิทช์อัตโนมัติจะถูกกระตุ้นให้หยุดนับเวลาและบันทึกค่าน้ำหนักที่อ่านได้ ณ เวลานั้นทันทีและถือเป็นน้ำหนักสิ้นสุดชบวนการ โดยวาล์วจะถูกกระตุ้นให้ปิดในเวลาพร้อมๆ กัน จากนั้นนำค่าน้ำหนักของของก่อนและหลังลบก้นออกจากกัน แก้ไขค่าตัวแปรต่างที่มีอิทธิพลต่อ น้ำและเครื่องชั่ง รวมทั้งแรงยกตัวอันเนื่องจากอากาศ (buoyancy force) กระทำต่อน้ำ และตัวแปรอื่นๆ

ความแม่นยำถูกต้องของการชั่งน้ำหนักสอบเทียบทั้ง 2 วิธีการก็ต้องคำนึงถึงความไม่แน่นอนของการวัดอีกด้วย พบว่าโดยทั่วไปค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) มักจะมีค่าน้อยกว่า 0.1% ในการค่าอัตราการไหลมวล

**ข้อดี** ของวิธีการสอบเทียบด้วยวิธีนี้ คือ เราสามารถทำการสอบเทียบมาตรวัดมวลด้วยการการชั่งมวลโดยตรง

**ข้อเสีย** ระบบที่ใช้สำหรับการสอบเทียบมีขนาดใหญ่และมีราคาแพงในการที่จะออกแบบ ,ติดตั้ง และดูแลรักษา อีกทั้งต้องใช้ระยะเวลาในแต่ละรอบการสอบเทียบสูงตั้งแต่ปล่อยของเหลวลงในถังบรรจุตามขนาดที่ต้องการ จนกระทั่งปล่อยของเหลวออกจากถัง ซึ่งหากทำการสอบเทียบมาตรวัดที่อัตราการไหลแตกต่างกันก็ยิ่งทำให้ใช้เวลาเพิ่มขึ้นอีกด้วย ทั้งมีข้อจำกัดของขนาดเครื่องชั่ง



Liquid calibration standards. (a) Static weighing. (b) Dynamic weighing. (c) Ballistic prover.

รูปแสดงวิธีการสอบเทียบ a) Static Weighing b) Dynamic Weighing และ c) Compact prover

3. การใช้ถังตวงแบบมาตรา (Volumetric standard) ได้มีความพยายามในการใช้ถังตวงแบบมาตราขนาดใหญ่สำหรับการสอบเทียบมาตรวัดมวล หลังจากทราบค่าปริมาตรที่แน่นอนจากถังตวงแบบมาตราแล้วทำการแปรค่าจากปริมาตรดังกล่าวด้วยการคูณตัวแปรแก้ไขค่าซึ่งวิธีการแก้ไขค่าปริมาตรดังกล่าวค่อนข้างเป็นวิธีการที่คุ้นเคยอยู่แล้วในการสอบเทียบอัตราการไหลของมาตรวัดต่างๆ (สามารถศึกษาได้จากหนังสือ "การคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตร" โดยสำนักงานกลางมาตราชั่งตวงวัด) ก่อนที่จะทำการคูณกับความหนาแน่นซึ่งสามารถหาค่าความหนาแน่นของเหลวได้จากระบบวัดซึ่งมาตรวัดติดตั้งอยู่ เพื่อปรับค่าปริมาตรที่ได้รับการแก้ไขไปเป็นค่าน้ำหนัก หรือมวล เช่นเดียวกับปริมาตร ความหนาแน่นก็มีการเปลี่ยนแปลงตามความดันและอุณหภูมิของเหลวเช่นกัน ดังนั้นก็จำเป็นต้องทำการปรับค่าความหนาแน่นที่วัดได้ก่อนที่ทำการคูณกับปริมาตรด้วยเช่นกัน

ข้อดี ของวิธีการนี้ คือ ไม่ว่าขั้นตอนการเตรียมการและการทำงานการสอบเทียบ รวมทั้งขั้นตอนการการคำนวณ การหาค่าปริมาตรจากถังตวงแบบมาตราแล้วทำการแก้ไขปรับปรุงปริมาตรดังกล่าวก่อนที่จะนำไปคูณกับความหนาแน่นเป็นที่รู้จักและคุ้นเคยกันเป็นอย่างดี

สำหรับวิธีการสอบเทียบที่ถูกต้องและลงในรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถค้นหาได้ในเอกสาร ANSI/ASME MFC-9M (1995) และใน ISO 4185 (1985)

**การสอบเทียบความหนาแน่น (density calibration)** นอกจากนี้ยังต้องทำการสอบเทียบ (calibration) มาตรวัดในส่วนของ การหาค่าความหนาแน่นซึ่งเป็นอีกหน้าที่หนึ่งของมาตรวัดชนิดนี้ การสอบเทียบความหนาแน่น (density calibration) กระทำโดยนำของเหลวซึ่งรู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอนแล้ว 2 ตัวอย่างใส่เข้าไปในท่อวัดของหน่วยวัด (sensor unit) จากนั้นทำการหาความถี่ธรรมชาติของการสั่นของท่อวัด (natural frequency of the vibrating tube) ของของเหลวทั้ง 2 ตัวอย่าง เนื่องจากเมื่อท่อวัดได้รับการกระตุ้นภายใต้สภาวะที่มีของเหลวต่างชนิดกัน มีความหนาแน่นต่างกันอยู่ภายใน ท่อวัดดังกล่าวก็จะให้ค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่แตกต่างกันด้วยเช่นกัน ซึ่งตัวถ่ายทอดสัญญาณ (transmitter) สามารถคำนวณหาค่าความชัน (slope) และตัวแปรเยื้อง (offset factors) โดยทำการหาค่าตัวแปร 2 ตัวจาก 2 สมการ จนกระทั่งได้ค่าความหนาแน่นออกมา หรือในมาตรวัดมวลบางชนิดสามารถทำการสอบเทียบความหนาแน่น (density calibration) ระหว่างของไหล (fluids) 2 ชนิดคือ ระหว่างอากาศกับน้ำบริสุทธิ์ (pure water)



## PROVING METHODS

<b>I. Tank</b>	Gravimetric	(Primary)
	Volumetric	(Secondary)
<b>II Volumetric Prover</b>	Coventional pipe (> 42 gallons)	(Tertiary)
	Small Volume (Compact; 10-30 gallons)	(Tertiary)
<b>III Master Meter</b>	Volume	(Tertiary, quaternary)
	CMF	(Secondary)

### รูปที่ 53 วิธีการสอบเทียบ

- I**    ถังตวงแบบมาตรา
- II**    ท่อสอบเทียบ (pipe prover) และ  
          ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover)
- III**    มาตรวัดมาตรฐาน (master meter)

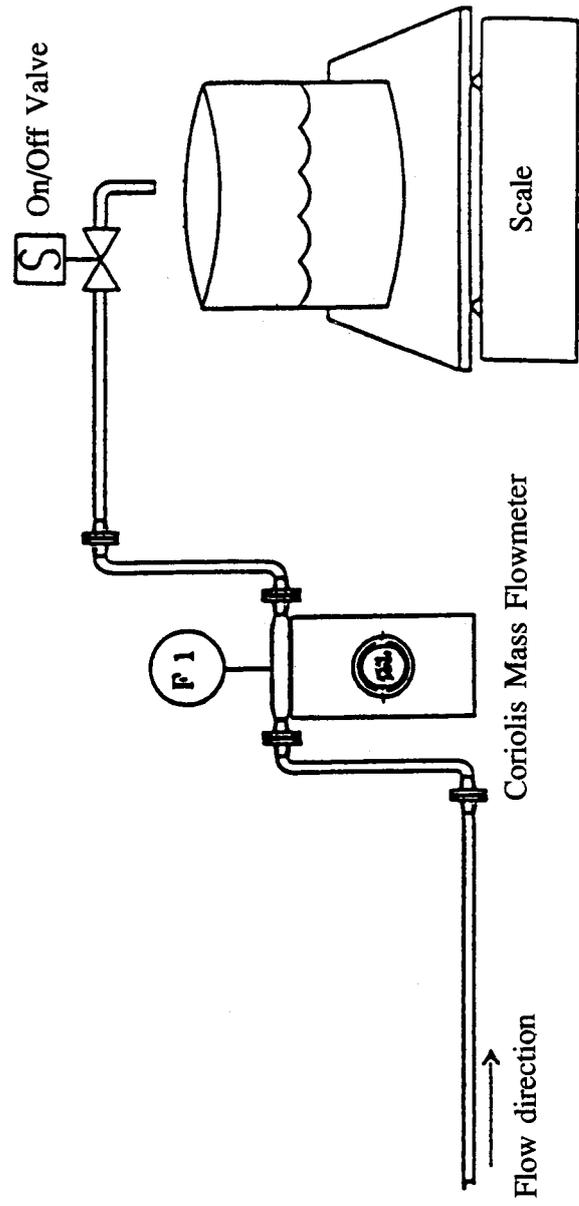
## Gravimetric Proving Method

$$M = W \times \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right)}$$

$\rho_a$  = density of air

$\rho_w$  = density of mass standard

$\rho$  = density of the measured product

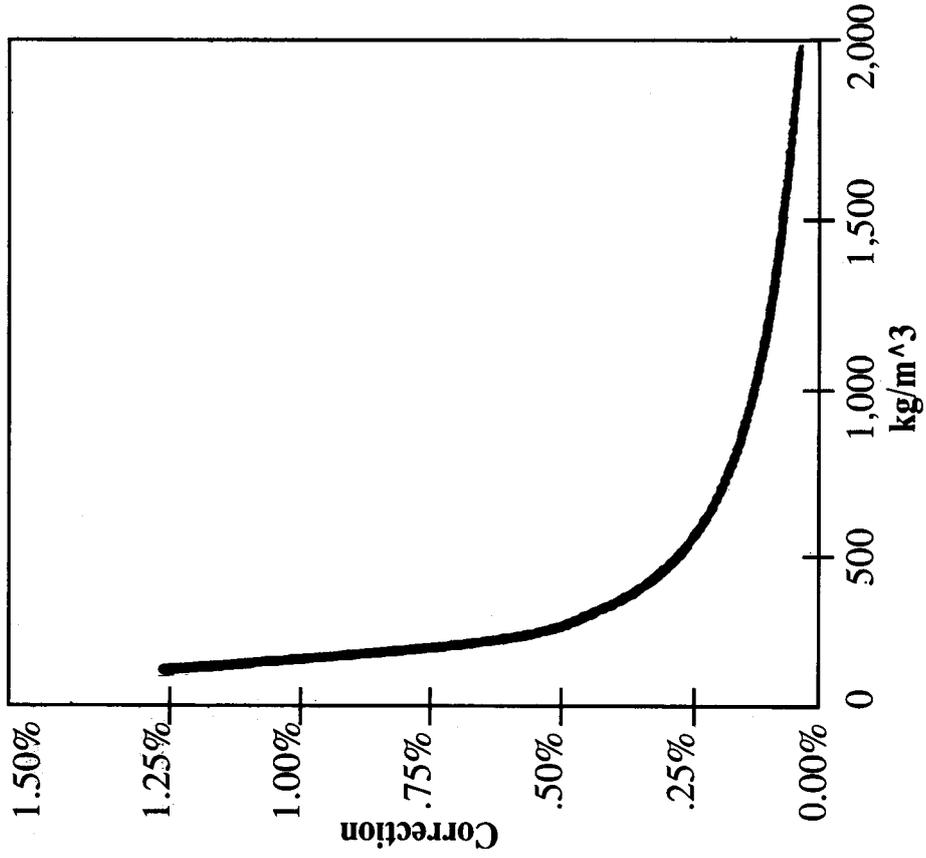


รูปที่ 54 การสอบเทียบด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก

# Effects of Fluid Density on Buoyancy

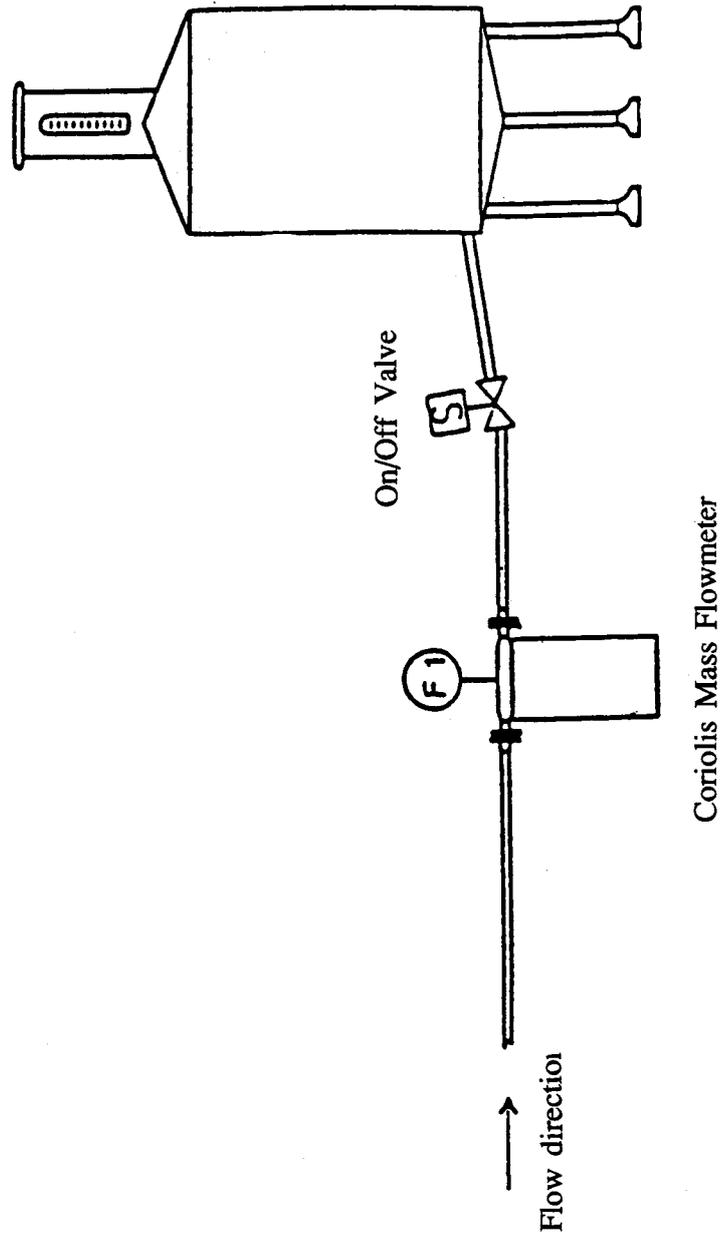
## Correction Factors

Density kg/m <sup>3</sup>	Correction Factor	Correction Percent
2,000	1.0005	.4500
1,900	1.0005	.0482
1,800	1.0005	.0517
1,700	1.0006	.0556
1,600	1.0006	.0600
1,500	1.0007	.0651
1,400	1.0007	.0708
1,300	1.0008	.0774
1,200	1.0009	.0851
1,100	1.0009	.0942
1,000	1.0011	.1051
900	1.0012	.1185
800	1.0014	.1352
700	1.0016	.1567
600	1.0019	.1854
500	1.0023	.2255



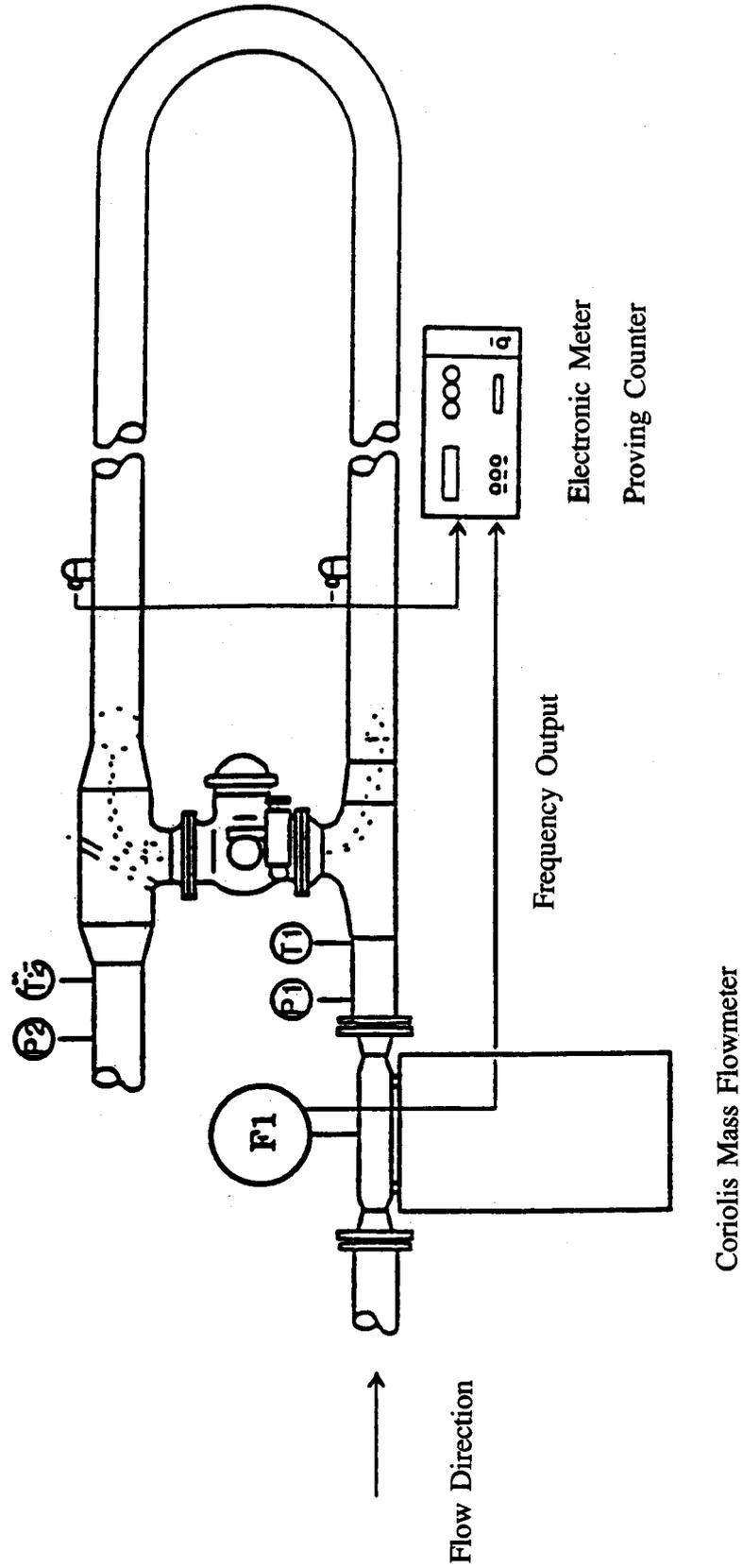
รูปที่ 55 อิทธิพลของความหนาแน่นต่อแรงลอยตัว

## Volumetric Tank Proving Method



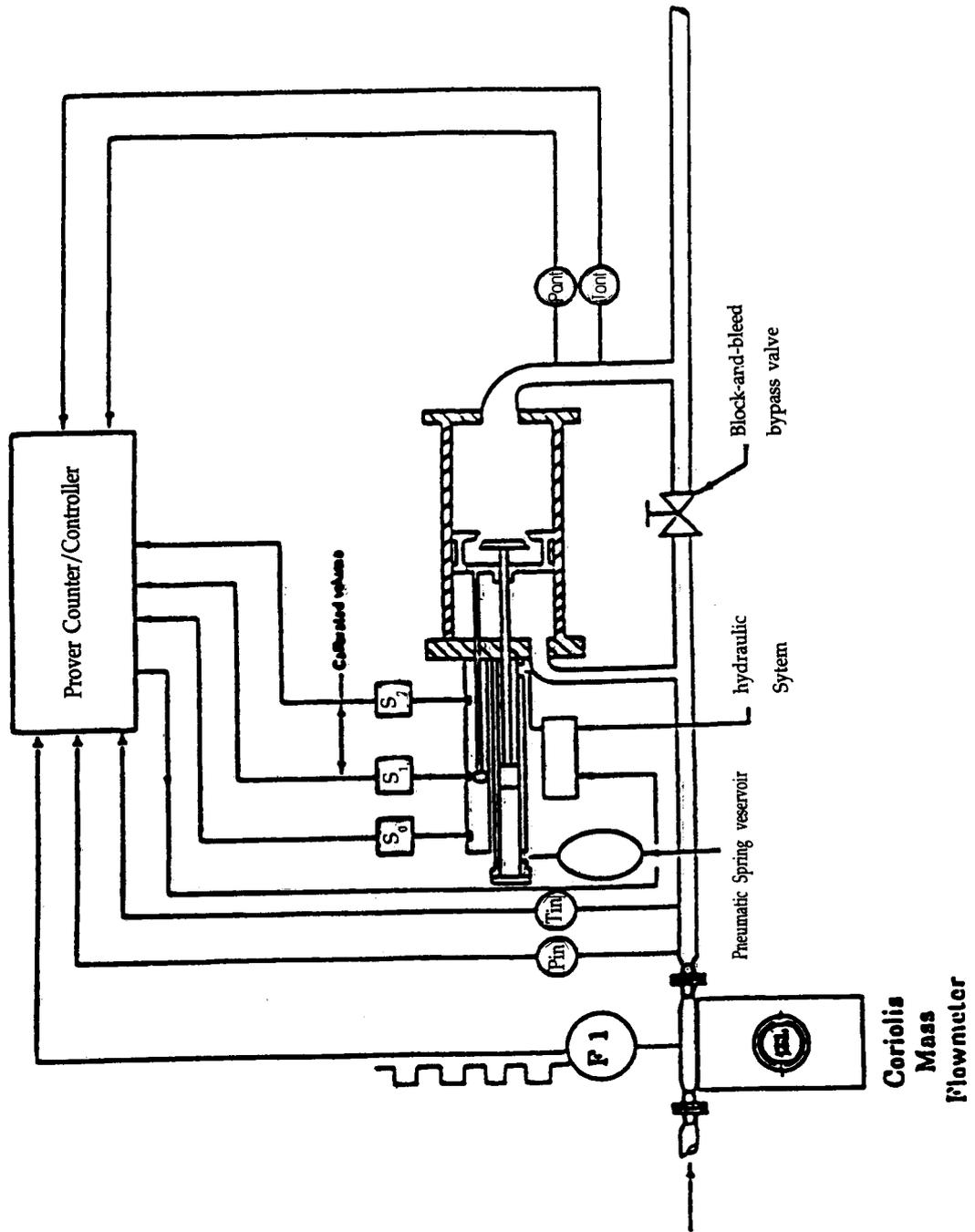
รูปที่ 56 การสอบเทียบด้วยถังตวงแบบมาตรา (tank prover)

# Conventional Prover Proving Method



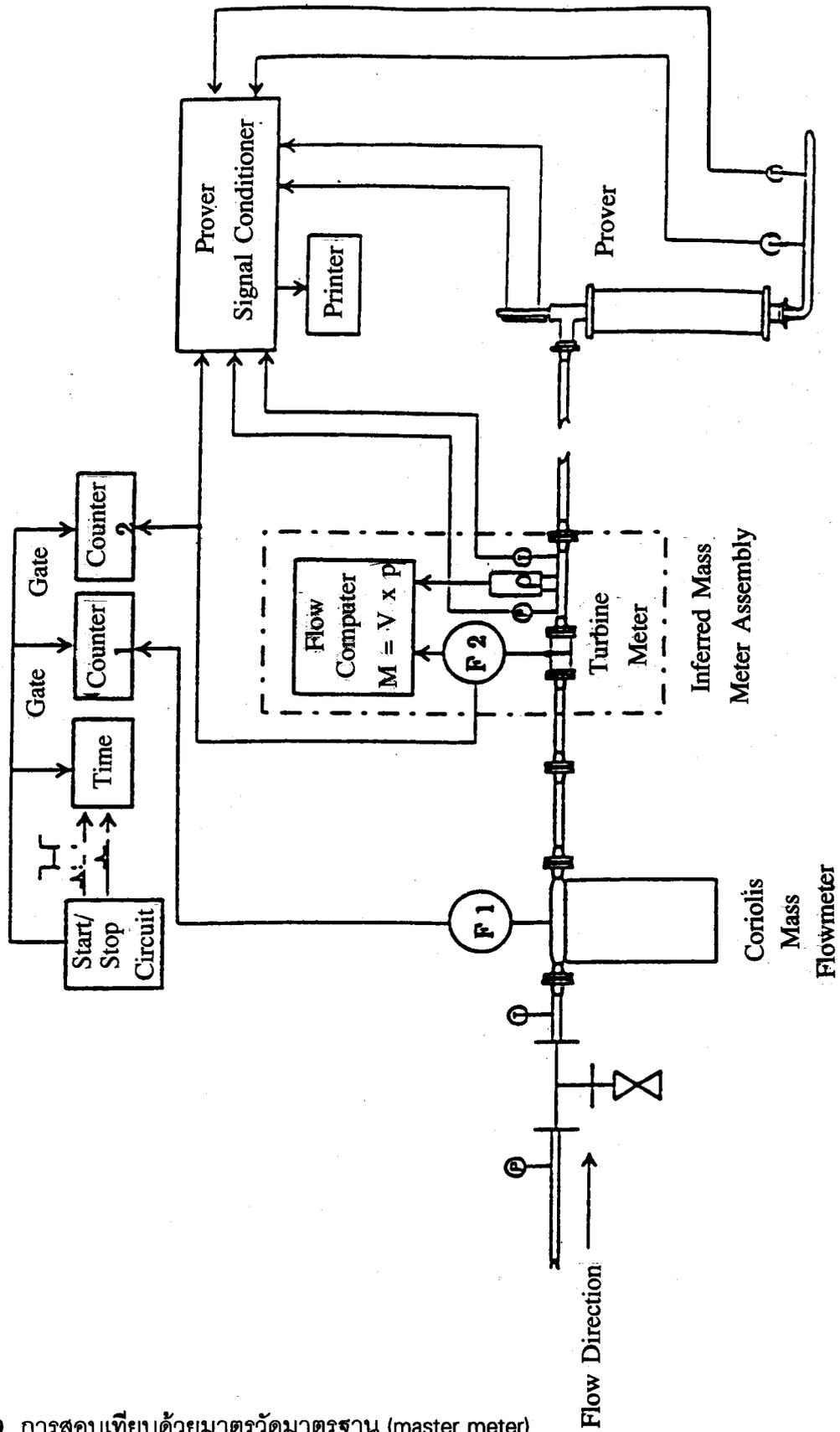
รูปที่ 57 การสอบเทียบด้วยท่อสอบเทียบ (pipe prover)

# Conventional Prover Proving Method



รูปที่ 58 การสอบเทียบด้วยท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover)

# Master Meter Proving Method



รูปที่ 59 การสอบเทียบด้วยมาตรวัดมาตรฐาน (master meter)

TABLE 1 CORIOLIS FORCE FLOWMETER - PROVING OVERVIEW

PROVING CONSIDERATIONS	PROVING METHOD					
	Tank Prover		Conventional Pipe	Small Volume	Master Meter	
	Gravimetric	Volumetric			Volumetric	Mass
Prover Design	Chapter 4.4	Chapter 4.4	Chapter 4.2	Chapter 4.3	Varies	Varies
Proving Procedure	Chapter 4.8	Chapter 4.8	Chapter 4.8	Chapter 4.8	Chapter 4.5 and 4.8	Chapter 4.5 and 4.8
Process Measurements CFF-Mass Constant Conditions	A <sup>1</sup> - None	B <sup>1</sup> - [ $\rho_p, T_p, (P_p)^2$ ] or [ $\rho_{nd}, T_p, (P_p)^2$ ]	B <sup>1</sup> - [ $\rho_p, T_p, P_p$ ] or [ $\rho_{nd}, T_p, P_p$ ]	B <sup>1</sup> - [ $\rho_p, T_p, P_p$ ] or [ $\rho_{nd}, T_p, P_p$ ]	B <sup>1</sup> - $\rho_p$ or $\rho_{nd}$	A <sup>1</sup> - None
Process Measurements CFF-Mass Varying Conditions	A <sup>1</sup> - None	B <sup>1</sup> - [ $\rho_p, T_p, (P_p)^2$ ] or [ $\rho_{nd}, T_p, P_p, T_M, P_M$ ]	B <sup>1</sup> - [ $\rho_p, T_p, P_p$ ] or [ $\rho_{nd}, T_p, P_p, T_M, P_M$ ]	B <sup>1</sup> - [ $\rho_p, T_p, P_p$ ] or [ $\rho_{nd}, T_p, P_p, T_M, P_M$ ]	B <sup>1</sup> - $\rho_p$ or [ $\rho_{nd}, T_p, P_p, T_M, P_M$ ]	A <sup>1</sup> - None
Process Measurements CFF-Volume Constant Conditions	D <sup>1</sup> - $\rho_{nd}$ or $\rho_p$	C <sup>1</sup> - [ $T_p, (P_p)^2$ ]	C <sup>1</sup> - [ $T_p, P_p$ ]	C <sup>1</sup> - [ $T_p, P_p$ ]	C <sup>1</sup> - None	D <sup>1</sup> - $\rho_{nd}$ or $\rho_p$
Process Measurements CFF-Volume Varying Conditions	D <sup>1</sup> - $\rho_{nd}$ or [ $\rho_p, T_p, P_p, T_M, P_M$ ]	C <sup>1</sup> - [ $T_p, (P_p)^2, T_M, P_M$ ] or [ $\rho_p, \rho_{nd}$ ]	C <sup>1</sup> - [ $T_p, P_p, T_M, P_M$ ] or [ $\rho_p, \rho_{nd}$ ]	C <sup>1</sup> - [ $T_p, P_p, T_M, P_M$ ] or [ $\rho_p, \rho_{nd}$ ]	C <sup>1</sup> - [ $T_p, P_p, T_M, P_M$ ] or [ $\rho_p, \rho_{nd}$ ]	D <sup>1</sup> - $\rho_{nd}$ or [ $\rho_p, T_p, P_p, T_M, P_M$ ]
Meter Factor Calculations <sup>1</sup> CFF - Mass	A	B	B	B	B CTS-P=1 CPS-P=1	A
Meter Factor Calculations <sup>1</sup> CFF - Volume	D	C	C	C	C CTS-P=1 CPS-P=1	D
Recommended Test Runs <sup>2</sup>	5	5	5	2 runs of 10 passes	5	5
Meter Factor Repeatability <sup>4</sup>	.05%	.05%	.05%	.05%	.05%	.05%
Meter Factor Reproducibility <sup>5</sup>	.25%	.25%	.25%	.25%	.25%	.25%

1 - Meter Factor Equations - refer to equations below and section 5.6.11.2.5.

2 - Pressure measurement is only required for closed vessel tank provers.

3 - Refer to Section 5.6.11.2.6.

4 - Refer to Section 5.6.11.2.7.

5 - Refer to Section 5.6.11.2.8.

$$A: MF-M = \frac{\text{Prover Mass}}{CMF \text{ Mass}}$$

$$B: MF-M = \frac{\text{Prover Volume} * CTS-P + CPS-P * \rho_p}{CMF \text{ Mass}}$$

$$C: MF-V = \frac{\text{Prover Volume} * CTS-P + CPS-P}{CMF \text{ Volume}} * \frac{CTL-P * CPL-P}{CTL-M + CPL-M}$$

$$D: MF-V = \frac{\text{Prover Mass}}{CMF \text{ Volume} * \rho_{nd}}$$

รูปที่ 60 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในแต่ละขั้นตอนการคำนวณของแต่ละวิธีการสอบเทียบ

## METER FACTOR EQUATIONS

$$A: \quad MF-M = \frac{\text{Pr overMass}}{\text{CMF.Mass}}$$

$$B: \quad MF-M = \frac{\text{Pr overVolume} \times \text{CTS(P)} \times \text{CPS(P)} \times \rho_{FP}}{\text{CMF.Mass}}$$

$$C: \quad MF-V = \frac{\text{Pr overVolume} \times \text{CTS(P)} \times \text{CPS(P)}}{\text{CMF.Mass}} \times \frac{\text{CTL(P)} \times \text{CPL(P)}}{\text{CTL(M)} \times \text{CPL(M)}}$$

$$D: \quad MF-V = \frac{\text{Pr overMass}}{\text{CMF.Volume} \times \rho_{FM}}$$

เมื่อ

$$\rho_{FP} = \rho_{FM} \times \frac{\text{CTL(P)} \times \text{CPL(P)}}{\text{CTL(M)} \times \text{CPL(M)}}$$

รูปที่ 61 สมการค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ ของแต่ละวิธีการสอบเทียบ

## PROVING TERMINOLOGY

**PULSE SCALING FACTOR:** Value set into the flowmeter transmitter that determines the number of pulses output per unit of mass or volume measured. (Usually equal to the K-Factor)

**K-FACTOR:** Value in pulses/mass or pulses/volume set into an external flow computer or prover, that is divided into the pulse output from the flowmeter to determine the measured mass or volume. (Usually equal to the Pulse Scaling Factor).

**PULSES or NFMP:** Number of full meter pulses output by the flowmeter during the proving run.

**nimp:** Number of interpolated meter pulses output by the flowmeter during the proving run. Used for small volume provers [ $NIMP = NFMP * (t_{\text{duration}} / t_{\text{meter}})$ ].

$$K \text{ FACTOR} \left( \frac{\text{Pulse}}{\text{lb}} \right) = \frac{\text{Frequency setting} \left( \frac{\text{Pulse}}{\text{sec}} \right)}{\text{Flow Rate Setting} \left( \frac{\text{lb}}{\text{min}} \right) * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}}}$$

$$K \text{ FACTOR} \left( \frac{\text{Pulse}}{\text{gal}} \right) = \frac{\text{Frequency setting} \left( \frac{\text{Pulse}}{\text{sec}} \right)}{\text{Flow Rate Setting} \left( \frac{\text{gal}}{\text{min}} \right) * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}}}$$

รูปที่ 62 คัพที่ใช้ในการสอบเทียบ

## PROVING TERMINOLOGY

- MF-M = Meter factor proved on a mass basis  
MF-V = Meter factor proved on a volume basis  
CTS(P) = Correction for thermal expansion of steel at the prover  
CPS(P) = Correction for pressure effect on steel at the prover  
CTL(P) = Correction for thermal expansion of process fluid at the prover  
CPL(P) = Correction for pressure effect on process fluid at prover  
CTL(M) = Correction for themal expansion of process fluid at the CMF

$\rho_P$  = Fluid density at the prover at flowing conditions

$\rho_M$  = Fluid density at the CMF at flowing conditions

$T_P$  = Fluid temperature at the prover

$T_M$  = Fluid temperature at the CMF

$P_P$  = Fluid pressure at the prover

$P_M$  = Fluid pressure at the CMF

รูปที่ 62 ศัพท์ที่ใช้ในการสอบเทียบ (ต่อ)

## PROVER VOLUME CORRECTION FACTORS

CTS-P = Correction factor for the effects temperature on the steel flowtube.

CTS-P =  $[1+(T_{\text{prover}}-60) (\text{SCE})] [1+(T_{\text{detector}}-60) (0.0000008)]$

SCE = The square coefficient of expansion of the steel in flow tube

Use .0000124/DGF Carbon Steel

Use .0000177/DGF 304 Stainless Steel

Use .00001 20/DGF 17-4 Stainless Steel

.0000008 = The Linear expansion of the invar spacing rods per degree fahrenheit.

CPS-P = The correction factor for the effects of pressure on the steel flow tube.

CPS-P =  $1 + (P * D)/(E * t)$

P = Pressure of the process liquid at the prover.

D = The inside diameter of the prover flow tube.

E = Modulus of elasticity of the steel in the prover flow tube. Besure to identify the type of steel used in the flow tube.

Use 30,000,000 PSI Carbon Steel

Use 28,500,000 PSI Stainless Steel

t = Wall thickness of the prover flow tube.

รูปที่ 63 ตัวแปรแก้ไขค่า (correction factors)

# REPEATABILITY CALCULATIONS

$$1) \text{ Repeatability } \% = \frac{\text{Measured Meter Pulses}_{MAX} - \text{Measured Meter Pulses}_{MIN}}{\text{Measured Meter Pulses}_{AVG \text{ ALL RUNS}}} * 100\%$$

$$2) \text{ Repeatability } \% = \frac{\text{CMF (MASS or VOLUME)}_{MAX} - \text{CMF (MASS or VOLUME)}_{MIN}}{\text{CMF (MASS or VOLUME)}_{AVG \text{ ALL RUNS}}} * 100\%$$

$$3) \text{ Repeatability } \% = \frac{\text{Meter Factor}_{MAX} - \text{Meter Factor}_{MIN}}{\text{Meter Factor}_{AVG \text{ ALL RUNS}}} * 100\%$$

Expected repeatability is  $\leq 0.05\%$ , Based on experience with turbine meters.

รูปที่ 64 การคำนวณหาค่าความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability)

# MICRO MOTION METER MASS PROVING FORM

DATE:

COSTOMER:

BASE PROVER VOLUME (gal) =

MICRO MOTION K-FACTOR (pulse/lb) =

[CHECK: PULSES/(PROVER VOL\*DENSIT\* 8.3454)]

FLOW RATE MICRO MOTION (lb/min) =

FLOW RATE PROVER (gal/min) =

RUN NUMBER:

1                      2                      3                      4                      5

TEMPERATURE PROVER (°F)

\_\_\_\_\_

CTS-P

\_\_\_\_\_

PRESSURE PROVER (psig)

\_\_\_\_\_

CPS-P

\_\_\_\_\_

PROVER DENSITY (g/cc)

\_\_\_\_\_

MICRO MOTION METER PULSES

\_\_\_\_\_

PROVERVOLUME (gal) =

\_\_\_\_\_

(Base Prover Vol\*CTS-P\*CPS-P)

\_\_\_\_\_

PROVER MASS (lb) =

\_\_\_\_\_

(Prover Vol\*DENSITY\*8.3454)

\_\_\_\_\_

METER MASS (lb) =

\_\_\_\_\_

(Pulses/K-Factor)

\_\_\_\_\_

METER FACTOR =

\_\_\_\_\_

(Prover Mass/Meter Mass)

\_\_\_\_\_

AVERAGE METER FACTOR =

\_\_\_\_\_

(AVG OF 5 ABOVE)

REPEATABILITY =

\_\_\_\_\_

รูปที่ 65 แบบฟอร์มตัวอย่างในการคำนวณการสอบเทียบ

# MICRO MOTION METER VOLUME PROVING FORM

DATE:

COSTOMER:

BASE PROVER VOLUME (gal) =

MICRO MOTION K-FACTOR (pulse/gal) =

(CHECK: PULSESS/PROVER VOL)

FLOW RATE MICRO MOTION (gal/min) =

FLOW RATE PROVER (gal/min) =

RUN NUMBER:

1                      2                      3                      4                      5

TEMPERATURE PROVER (°F) \_\_\_\_\_

CTS-P \_\_\_\_\_

CTS-P \_\_\_\_\_

PRESSURE PROVER (psig) \_\_\_\_\_

CPS-P \_\_\_\_\_

CTS-P \_\_\_\_\_

TEMPERATURE PROVER (°F) \_\_\_\_\_

CTL-M \_\_\_\_\_

PRESSURE METER (psig) \_\_\_\_\_

CTL-M \_\_\_\_\_

MICRO MOTION METER PULSES \_\_\_\_\_

PROVER VOLUME (gal) = \_\_\_\_\_

[(Base Vol\*CTS-P\*CPS-P)\*CTL-M\*CPL-M] \_\_\_\_\_

METER MASS (lb) = \_\_\_\_\_

[(Pulses/K-Factor)\*CTL-M\*CPL-M] \_\_\_\_\_

METER FACTOR = \_\_\_\_\_

(Prover Volume/Meter Volume) \_\_\_\_\_

AVERAGE METER FACTOR = \_\_\_\_\_

(AVG OF 5 ABOVE)

REPEATABILITY = \_\_\_\_\_

รูปที่ 65 แบบฟอร์มตัวอย่างในการคำนวณการสอบเทียบ (ต่อ)



**ภาคผนวก**



Flowmeter Selection Table  
(Courtesy of The Foxboro Company)

FLOWMETER	PIPE SIZE, in (mm)	GASES (VAPORS)		LIQUIDS						TEMPERATURE, °F (°C)	PRESSURE, psig (kPa)	ACCURACY, UNCALIBRATED (INCLUDING TRANSMITTER)	REYNOLDS NUMBER	
		CLEAN	DIRTY	CLEAN	VISCOUS	DIRTY	CORROSIVE	FERROUS	SLURRIES / ABRASIVE					
<b>SQUARE ROOT SCALE: MAXIMUM SINGLE RANGE 4:1</b>														
ORIFICE														
SQUARE-EDGED	>1.5 (40)												±1-2% URV*	R <sub>D</sub> >2000
HONED METER RUN FOXBORO IFOA	0.5-1.5 (12-40)												±1% URV	R <sub>D</sub> >1000
INTEGRAL	<0.5 (½)												±2-5% URV	R <sub>D</sub> >100
QUADRANT/CONIC EDGE	>1.5 (40)												±2% URV	R <sub>D</sub> >200
ECCENTRIC	>2 (50)												±2% URV	R <sub>D</sub> >10,000
SEGMENTAL	>4 (100)												±2% URV	R <sub>D</sub> >10,000
ANNULAR	>4 (100)												±2% URV	R <sub>D</sub> >10,000
TARGET	>0.5-4 (12-100)												±1.5-5% URV	R <sub>D</sub> >100
VENTURI	>2 (50)												±1-2% URV	R <sub>D</sub> >75,000
FLOW NOZZLE	>2 (50)												±1-2% URV	R <sub>D</sub> >10,000
LO-LOSS	>3 (75)												±1.25% URV	R <sub>D</sub> >12,500
PITOT	>3 (75)												±5% URV	NO LIMIT
MULTIPOINT AVERAGING	>1 (25)												±1.25% URV	R <sub>D</sub> >10,000
ELBOW	>2 (50)												±4.25% URV	R <sub>D</sub> >10,000
<b>LINEAR SCALE: TYPICAL RANGE 10:1</b>														
MAGNETIC	0.1-172 (25-1800)										360 (180)	≤ 1500 (10,500)	±0.5% OF RATE TO ±1% URV	NO LIMIT
MASS FLOWMETER CORIOLIS											<570 (300)	<2000	±0.2% TO ±1% OF RATE	NO LIMIT
POSITIVE DISPLACEMENT	<12 (300)										GASES: 250 (120) LIQUIDS: 600 (315)	≤ 1400 (10,000)	GASES: ±1% URV LIQUIDS: ±0.5% OF RATE	≤ 8000 cSt
TURBINE	0.25-24 (6-600)										-450-500 (-268-260)	≤ 3000 (21,000)	GASES: ±0.5% OF RATE LIQUIDS: ±1% OF RATE	≤ 2-15 cSt
ULTRASONIC											-450-500 (-268-260)			
TIME-OF-FLIGHT	>0.5 (12)										-300-500 (180-260)	PIPE RATING	±1% OF RATE TO ±5% URV	NO LIMIT
DOPPLER	>0.5 (12)										-300-250 (-180-120)	PIPE RATING	±5% URV	NO LIMIT
VARIABLE AREA	≥ 3 (75)										GLASS: ≤ 400 (200) METAL: ≤ 1000 (540)	GLASS: 350 (2400) METAL: 720 (5000)	±0.5% OF RATE TO ±1% URV	TO HIGHLY VISCIOUS FLUIDS
VORTEX	0.5-16 (12-400)										≤ 750 (400)	≤ 1500 (10,500)	±0.5-1.5% OF RATE	<10,000

\*URV = UPPER RANGE VALUE OF THE FLOW RATE; FORMERLY FULL SCALE FLOW RATE.  
 ■ = DESIGNED FOR THIS APPLICATION;  
 □ = NORMALLY APPLICABLE;  
 □ = NOT DESIGNED FOR THIS APPLICATION

ก - 1 ตารางเลือกมาตรฐาน

# Categorizing Flowmeters by Process-Dominated Factors

Flowmeter Type	CLEAN LIQUIDS		DIRTY LIQUIDS	CORROSIVE LIQUIDS	VISCIOUS LIQUIDS	ABRASIVE SLURRIES	FIBROUS SLURRIES	LOW VELOCITY FLOWS	VAPOR OR GAS	HI TEMP. SERVICE	CRYOGENIC SERVICE	SEALED PIPES	NON-NEWTONIANS	OPEN CHANNEL
	ORIFICE	VENTURI												
<b>1 DIFFERENTIAL PRESSURE</b>														
<b>2 MAGNETIC</b>	FLOW NOZZLES AND TUBES													
	PITOT TUBES													
<b>3 MASS</b>	ELBOW													
	CORIOLIS													
<b>4 OSCILLATORY</b>	THERMAL													
	VORTEX SHEDDING													
	FLUIDIC													
<b>5 POSITIVE DISPLACEMENT</b>	VORTEX PRECESSION													
	TARGET													
<b>7 TURBINE</b>	TRANSIT TIME													
	DOPPLER													
<b>8 ULTRASONIC</b>	VARIABLE AREA													
	WEIRS AND FLUMES													

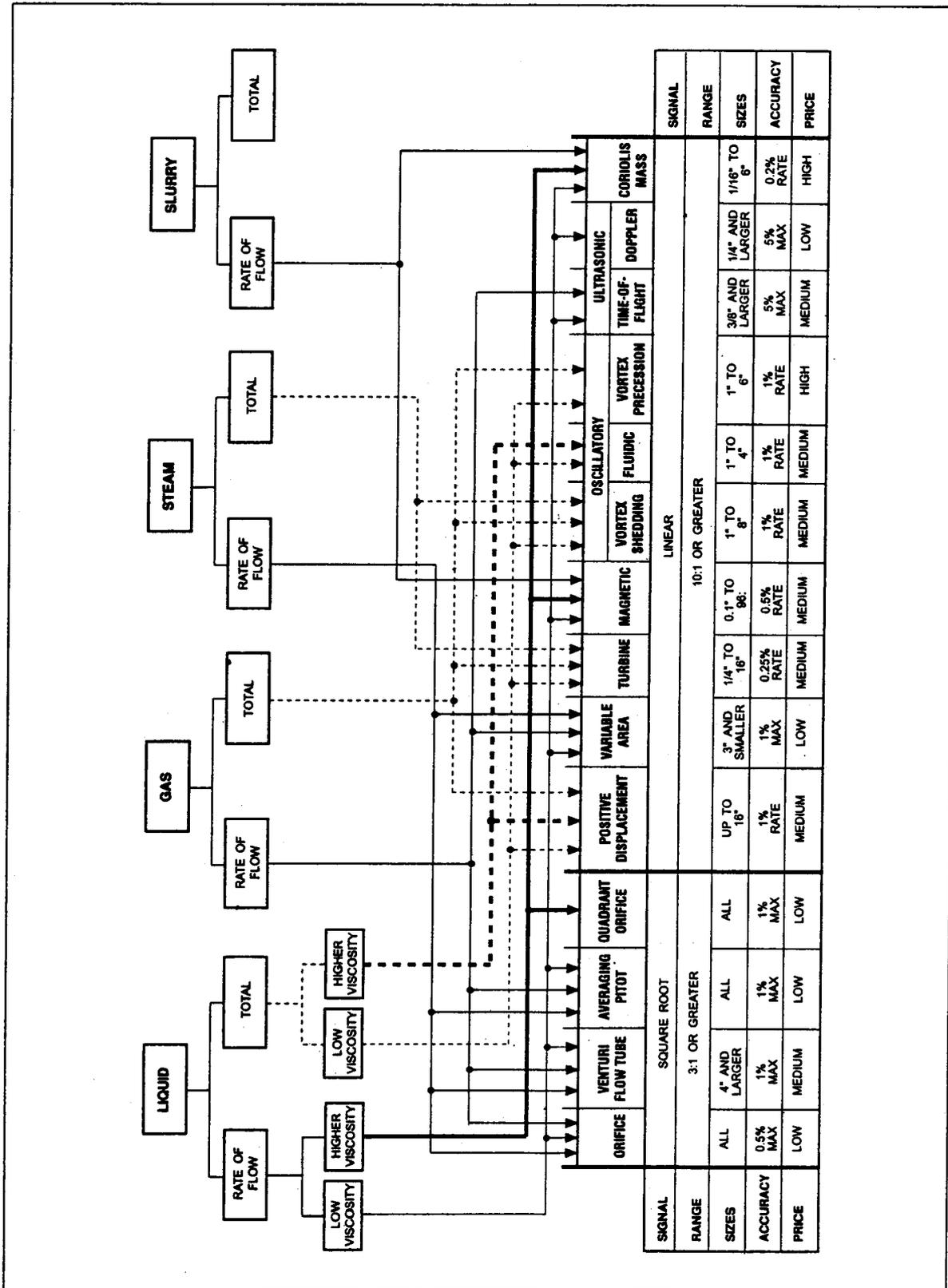
**FLOWMETER APPLICATIONS**

- DESIGNED FOR THIS SERVICE
- APPLICABLE FOR THIS SERVICE UNDER CERTAIN CONDITIONS, CONSULT MANUFACTURER
- NORMALLY APPLICABLE FOR THIS SERVICE
- NOT APPLICABLE FOR THIS SERVICE

**Guide to Flow Measurement**  
(Courtesy Instruments and Control Systems Magazine)

ก - 2 ข้อแนะนำการวัดการไหล

## Categorizing Flowmeters by Process-Dominated Factors



Flowmeters Categorized by Fluid State

ก - 3 การจัดจำแนกมาตรวัดโดยสภาพของไหล

# Flowmeter Selection

	APPLICATIONS								FEATURES										
	CLEAN LIQUID	DIRTY LIQUID	VISCOUS LIQUID	CORROSIVE	SLURRIES	CLEAN GAS	DIRTY GAS	STEAM	SIZES AVAILABLE	ACCURACY	RANGEABILITY	REYNOLDS NUMBERS	VISCOSITY EFFECTS	PRESSURE LOSS	RELATIVE COST	PIPING REQUIRED UPSTREAM	INSTALLATION	MAINTENANCE	TYPE OF OUTPUT
ORIFICE PLATE	●					●		●	> 1"	3/4%	3/1	> 30,000	H	H	L	10-30D	M-H	M-H	√
INTEGRAL ORIFICE	●					●		●	1", 1.5"	2%	3/1	> 10,000	H	H	L	10-30D	L	M-H	√
WEDGE™	●	●	●	○	●	●	●	●	> .5"	1/2%	3/1	> 500	H	M	H	10-30D	L	L	√
FLOW NOZZLE	●	○	○	○	○	●	○	○	> 2"	1-1/2%	3/1	> 75,000	H	M	M	10-30D	M	L	√
VENTURI TUBE	●	○	○	○	○	●	○	○	> 2"	1%	3/1	> 75,000	H	L	H	5-10D	M	L	√
ELBOW	●	○	○	○	○	●	○	○	> 2"	5%	3/1	> 10,000	H	L	L	NONE	M	L	√
PITOT-VENTURI	○					●			> 6"	3%	3/1	> 100,000	H	L	L	20-30D	M	L	√
PITOT	●		○	○	○	●			> 3"	3%	3/1	> 100,000	H	L	L	20-30D	M	L	√
FLOBAR™	●	○	○	○	○	●	○	○	> .5"	1%	3/1	> 40,000	H	L	L	10-20D	L	L	√
MAGNETIC	●	●	●	●	●	●	●	●	> .1"	1/2%	10/1	NONE	N	L	H	5D	H	M	LINEAR
ROTAMETER	●			○		●		○	≤ 3"	2%	10/1	NONE	M	M	L	NONE	L	L	LINEAR
TURBINE	●			○		●		●	> .25"	1/2%	10/1 TO 50/1	≤ 2-15 cSI	H	H	M	10-20D	L	M-H	LINEAR
POSITIVE DISPLACEMENT	●	○	○	○		●		○	< 12"	1%	20/1	≤ 8000 cSI	N	H	H	NONE	H	H	LINEAR
VORTEX SHEDDING	●	○	○	○		●	○	○	> 1"	1%	20/1	> 10,000	N	M	M	15-25D	M	M	LINEAR
DOPPLER	○	○	○	○	○				> .5"	2-5%	10/1	NONE	N	L	M	5-20D	L	L	LINEAR
TRANSIT TIME	●			○					> .5"	2-5%	10/1	NONE	N	L	M	5-20D	L	L	LINEAR
MASS	●	●	●	○	○	●	○	○	< 6"	1/4%	25/1	NONE	N	M	H	NONE	H	L-M	LINEAR
TARGET	●	●	●	○	○	●	●	●	> .5" - 4"	1-1/2 - 5%	10/1	> 100	M	M	L	10-20D	L	M	√

● RECOMMENDED  
 ○ LIMITED APPLICABILITY  
 □ NOT RECOMMENDED

N - NONE  
 L - LOW  
 M - MEDIUM  
 H - HIGH

Flowmeter Selection Guide [Ref. 7]

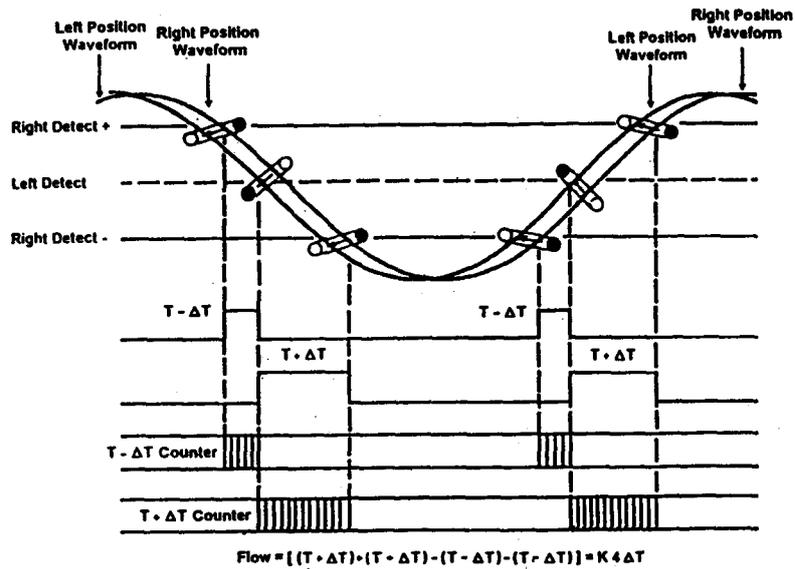
ก - 4 แนวทางการเลือกมาตรวัด

METER PRINCIPLE		PIPING REQUIREMENTS (NOTE 1)											ANCILLARY EQUIPMENT REQUIREMENTS (SEE PIPING DIAGRAM)								
		UPSTREAM PIPE LENGTH	DOWNSTREAM PIPE LENGTH	PIPE MATERIAL	PIPE WALL THICKNESS	CONDITION OF PIPE ID	CONCENTRICITY OF METER ID WITH PIPE ID	METER ORIENTATION			SUPPORT		FLOW COND. TIONERS		STRAINER OR FILTER	AIR ELIMINATOR	BLOCK VALVES	TRANSMITTER LOCATION	SENSING PIPING	ISOLATION MANFOLD	
NO. CATEGORY	TYPE	NOTE 2	NOTE 2	NOTE 2	NOTE 2	NOTE 4	NOTE 5	NOTE 6	NOTE 7	NOTE 8	NOTE 9	NOTE 10	NOTE 11	NOTE 12	NOTE 13	NOTE 14					
1	DP																				
	ORIFICE																				
	VENTURI																				
	FLOW NOZZLE																				
2	MASS																				
	FLOW TUBE																				
	ELBOW																				
	PILOT																				
3	OSCILLATORY																				
	VORTEX PRECESS.																				
	VORTEX SHEDDING																				
	FLUIDIC																				
4	MAGNETIC																				
	AC EXCITED																				
5	TURBINE																				
	PULSE DC EXCITED																				
6	ULTRASONIC																				
	DOP. CLAMP-ON																				
	DOP. METER BDY																				
	ToF CLAMP-ON																				
7	TARGET																				
	ToF METER BID																				
8	PD																				

LEGEND: INSTALLATION REQUIREMENTS ESSENTIAL TO GOOD MEASUREMENT.  
 INSTALLATION REQUIREMENTS RECOMMENDED FOR GOOD MEASUREMENT.  
 CONSULT MANUFACTURER.  
 NOT A FACTOR.

Guide to Flowmeter Installation [Ref. 11]  
 (Courtesy Instruments and Control Systems Magazine)

ก - 5 ข้อแนะนำการติดตั้งมาตรวัด

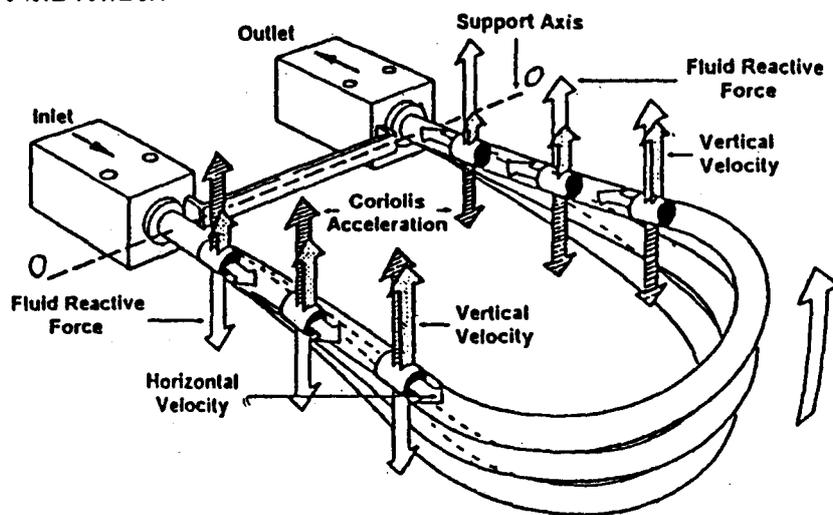


RFT9739 Detection of Flow Tube Phase Shift ( $\Delta T$ )

ก - 6 ตัวอย่างการตรวจจับการเคลื่อนที่ของท่อวัดเมื่อมีของเหลวไหลผ่าน

### ข. การหาค่าแรงคอริออริส (Coriolis Force)

เมื่อของเหลวมีมวล  $m$  ไหลภายในท่อวัดด้วยความเร็วเฉลี่ยคงที่เท่ากับ  $\bar{v}$  นี้ ออกจากแกนหมุน  $O-O$  ของท่อวัด ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยตัวกำเนิดคลื่นสะท้อน (Drive Coil) ให้หมุน หรือสั่งด้วยความเร็วเชิงมุม (angular velocity) คงที่เท่ากับ  $\omega$  ที่ความถี่ธรรมชาติของท่อวัด ส่งผลให้ของเหลวมีการเคลื่อนที่ภายในท่อวัดด้วยความเร่งคงที่อันเป็นผลของการสั่งของท่อวัดดังกล่าว เราเรียกความเร่งนี้ว่า “ความเร่งคอริออริส (coriolis acceleration)” ซึ่งจะมีค่าคงที่ตลอดแนวความยาวท่อวัด



Flow Tube Response to Coriolis Acceleration

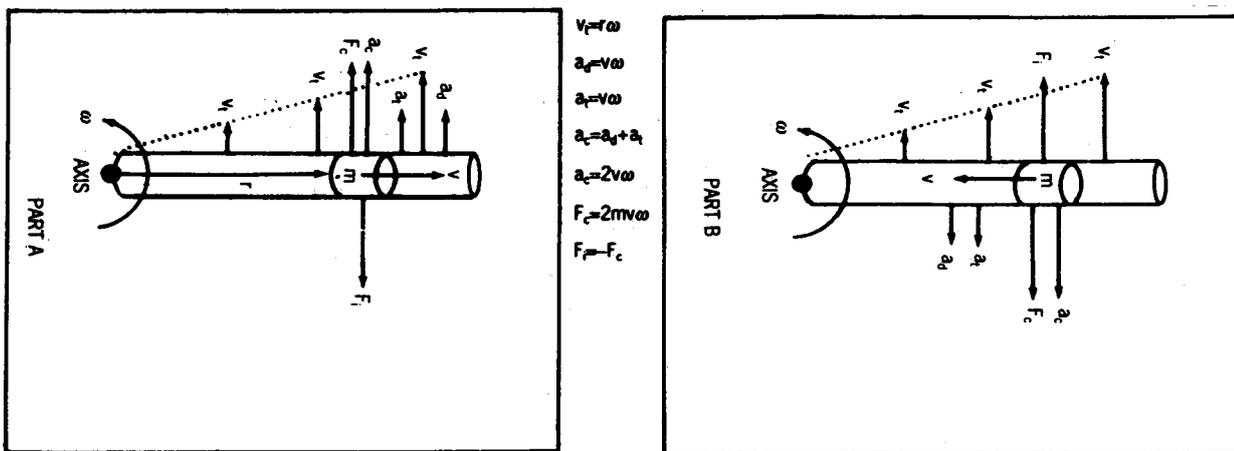
รูปที่ ข-1 การตอบสนองของท่อวัดต่อความเร่งคอริออริส (coriolis acceleration)

ความเร่งคอริออริส ประกอบด้วยกัน 2 ส่วนด้วยกัน เมื่อพิจารณาขณะที่ท่อดึงถูกกระตุ้นให้สั่นด้วยความถี่ธรรมชาติโดยตัวกำเนิดสั่นสะเทือนเคลื่อนที่ขึ้นและบริเวณท่อดึงเข้า ความเร่งส่วนแรกเป็นความเร่งเป็นผลมาจากการหมุนหรือการสั่นของท่อดึงก่อให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางความเร็วของเหลวซึ่งไหลอยู่ภายในท่อดึง  $\vec{v}$  ขนาดของความเร่งอันเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางความเร็วของเหลว (*directional acceleration*)  $a_d$  ส่วนนี้จึงมีค่าเท่ากับ

$$\vec{a}_d = \omega \times \vec{v}$$

ส-1

ทิศของความเร่งส่วนนี้มีทิศทางขึ้นดังรูป ข-1 และ ข-2



รูปที่ ข-2 แรงคอริออริสบริเวณท่อดึงเข้า รูปที่ ข-3 แรงคอริออริสบริเวณท่อดึงออก

สำหรับส่วนประกอบที่ 2 ของความเร่งคอริออริส เป็นผลเกิดจากการเปลี่ยนความเร็วเชิงเส้น (*linear velocity*) เทียบกับระยะห่างจากแนวแกนหมุนหรือแกนรับ (*support axis*) O-O ทำให้เกิดความเร็วของเหลวในแนวตั้งฉาก (*vertical velocity*) กับท่อดึงโดยความเร็วนี้จะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากแนวแกนรับด้วยอัตราคงที่หรือด้วยความเร่งคงที่นั่นเอง. ในขณะที่ของเหลวเคลื่อนที่ภายในท่อดึงด้วยความเร็วสัมผัสเมื่อเทียบกับท่อดึง (*horizontal velocity*) มีค่าคงที่ ;  $\vec{v}$  โดยความเร็วของเหลวในแนวตั้งฉาก (*vertical velocity*) กับท่อดึง ;  $v_t$  มีค่าเท่ากับ

$$v_t = r\omega$$

ส-2

ดังนั้นเมื่อของเหลวอยู่ ณ แกนหมุนหรือแกนรับ O-O ความเร็วของเหลวในแนวตั้งฉากจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อเคลื่อนที่หนีห่างจากแกนหมุนหรือแกนรับ O-O ค่า  $r$  ก็เพิ่มสูงขึ้นทำให้ความเร็ว  $v_t$  ก็เพิ่มสูงขึ้นตามก่อให้เกิดความเร่งเชิงเส้น (*linear acceleration*) ;  $a_t$  มีค่าเท่ากับ

$$a_t = \frac{dv_t}{dt} = \frac{d(r\omega)}{dt} = \omega \frac{dr}{dt} = \omega \bar{v}$$

$$a_t = \omega \bar{v} \quad \text{ส-3}$$

ทิศของความเร่งส่วนนี้มีทิศทางเช่นเดียวกับทิศทางความเร็วในแนวตั้งฉากทางด้านขาเข้าท่อวัดคือ มีทิศขึ้น ดังรูป ข-2 ในขณะที่ด้านทางออกของท่อวัดทิศของความเร่งส่วนนี้มีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางความเร็วในแนวตั้งฉาก

ความเร่งคอริออริส (*coriolis acceleration*) ;  $a_c$  ซึ่งจะมีค่าคงที่ตลอดแนวความยาวท่อวัดจึงมีค่าเท่ากับ

$$\bar{a}_c = \bar{a}_d + \bar{a}_t \quad \text{ส-4}$$

$$\bar{a}_c = 2(\omega \times \bar{v}) \quad \text{ส-5}$$

หรือ

$$a_c = 2\omega \bar{v}$$

จะเห็นได้ว่าความเร่งคอริออริสจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อของเหลวไม่มีการไหลผ่านท่อวัดนั้นคือ  $\bar{v}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ทิศของความเร่งคอริออริสมีทิศขึ้น

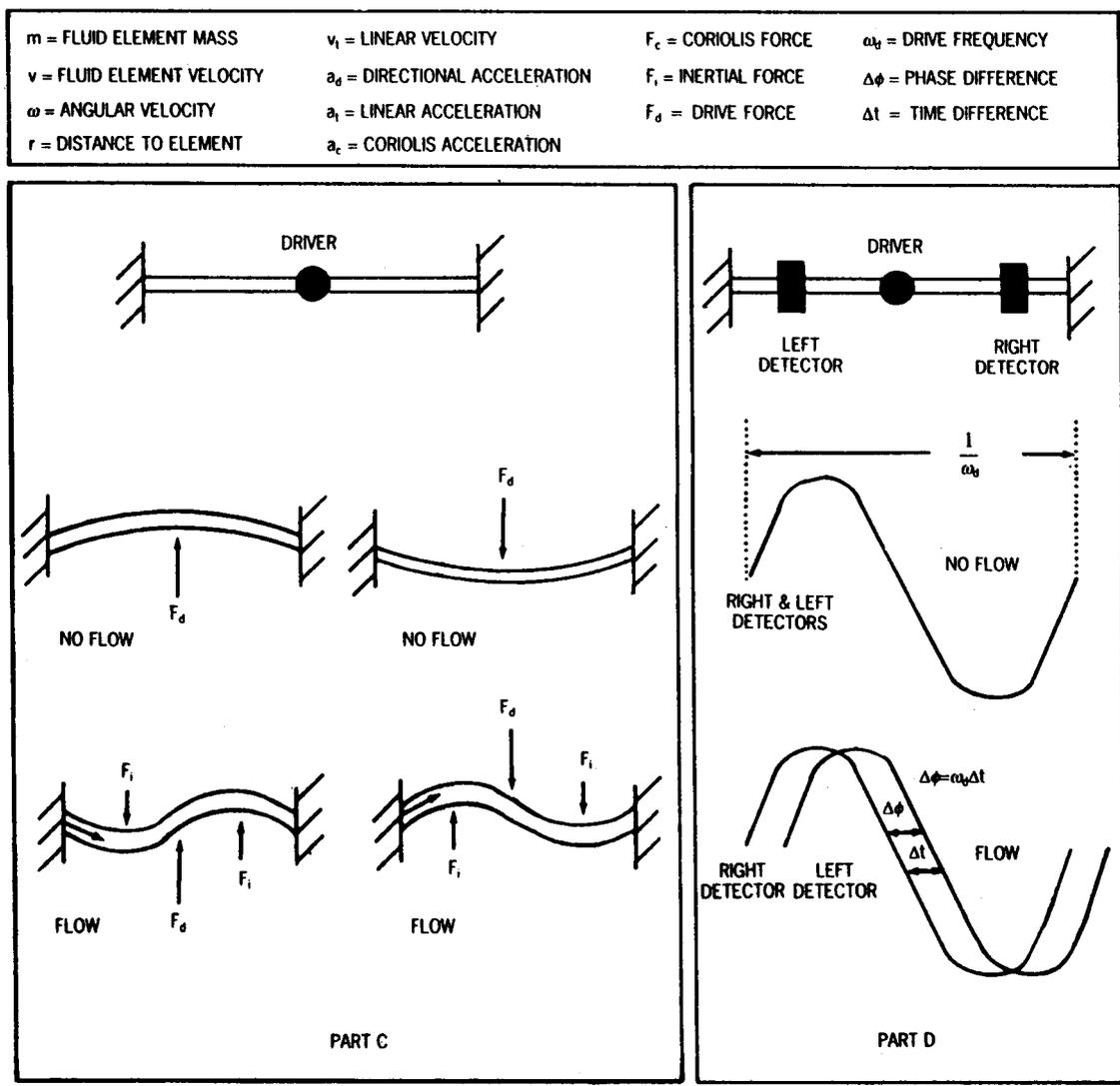
จากกฎนิวตันข้อที่ 2  $\bar{F} = m\bar{a}$  ดังนั้นเราสามารถหาแรงคอริออริส อันเนื่องมาจากความเร่งคอริออริสได้จาก

$$\begin{aligned} \bar{F}_c &= m\bar{a}_c \\ &= m(2\omega \times \bar{v}) \end{aligned} \quad \text{ส-6}$$

เนื่องจากกฎนิวตันข้อที่ 2 ว่า  $F = ma$  เมื่อพบว่าของเหลวมีความเร่งคงที่ดังนั้นแรงกระทำต่อของเหลวจึงขึ้นอยู่กับมวลของเหลวเท่านั้น แต่เพราะเมื่อมีแรงกิริยาย่อมมีแรงปฏิกิริยาจากกฎข้อ

ที่ 3 ของนิวตัน ดังนั้นเมื่อมีแรงที่ท่อวัดกระทำต่อของเหลวเนื่องจากการสั่นของท่อวัดส่งผลให้ของเหลวมีแรงกระทำต่อท่อวัด (*fluid reactive force*) ด้วยขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้าม (ทิศทางตรงข้ามกับ *coriolis acceleration*) อันเนื่องจากแรงเฉื่อยของของเหลวนั้นเอง

เมื่อพิจารณาขณะที่ท่อวัดถูกกระตุ้นให้สั่นด้วยความถี่ธรรมชาติโดยตัวกำเนิดสั่นสะเทือนเคลื่อนที่ขึ้นและบริเวณท่อวัดขาออก ความเร่งคอริโอลิส และแรงคอริโอลิส จะเกิดในทิศทางกลับกันรวมทั้งแรงปฏิกิริยาอันเกิดจากของเหลวมีแรงกระทำต่อท่อวัด (*fluid reactive force*) ก็เช่นกัน ซึ่งแรงคอริโอลิสทั้งสองมีค่าเท่ากันแต่มีทิศทางตรงข้ามกันด้วยจึงเกิดโมเมนต์ดังอธิบายในบทที่ 2





1. *Flow Measurement; Practical Guides for Measurement and Control*, D.W. Spitzer; Editor, Instrument Society of American (ISA), 2nd Printing, 1996
2. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลโดยมวล (*Direct mass flow measurement*), กิตติ ว่องสินไพบูลย์, บริษัท โพลีเทคโนโลยี จำกัด, วารสารเทคนิค
3. *Applied Instrumentation in the Process Industries, Volume I*, Second edition, ASurvey, W.G. Andrew, H.B. Williams, Gulf Publisher, 1979
4. *Flow Measurement*, BELA G. LIPTAK; Editor-in-Chief, Chilton Book Company 1 Radnor, Pennsylvania, 1993
5. *MICRO MOTION, INC. CUSTOMER TRAINING, COURSE PARTICIPANT'S MANUAL*, 1993, Micro Motion, Inc.
6. *Bulletin SS0M013 Issue/Rev. 0.1(12/94)*, Smith Meter Inc. A Micro Company
7. *Flow Measurement Engineering Handbook*, Third edition, Richard W. Miller, McGraw-Hill, 1996

**พิมพ์ที่โรงพิมพ์ข่าวพาณิชย์**

**22/77 ถนนรัชดาภิเษก เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900**

**โทร. 5115066-77**

**สำนักงานกลางมาตรฐานชั่งตวงวัด**  
**(Central Bureau of Weights & Measures)**  
**กรมทะเบียนการค้า**