

เครื่องมือวัดความดันและเครื่องมือวัดอัตราการไหล

(Pressure sensor and Flow - meter sensor)

แปลและเรียบเรียงโดย น.ต.สมมาตร กุบกระบี

น.ต.สิทธิรักษ์ พรหมณี

เครื่องมือวัดความดันและเครื่องมือวัดอัตราการไหลของของไหล เป็นส่วนประกอบของระบบควบคุมที่ทำหน้าที่ในการป้อนกลับข้อมูล (Feedback signal) ให้กับระบบควบคุมเครื่องมือวัดทั้งสองแบบนี้จะมีความเกี่ยวข้องและเป็นประโยชน์กับระบบต่างๆ ภายในเรือมาก เช่น ใช้วัดความดันของน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องจักรใหญ่ เครื่องจักรช่วยวัดระดับของเหลวในถังต่างๆ และวัดความเร็วรอบเรือเป็นต้นบทความนี้เป็นการแนะนำให้รู้จักวิวัฒนาการของเครื่องมือดังกล่าวพร้อมกับหลักการทำงานขั้นพื้นฐาน

เครื่องมือวัดความดัน

ชนิดของเครื่องมือวัดความดันสามารถแบ่งตามเกณฑ์อ้างอิงของความดันบรรยากาศและความดันสมบูรณ์ได้ ๒ ชนิด ใหญ่ ๆ คือ

๑. **Gauge pressure sensor** คือเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดความดันโดยใช้เกณฑ์ความดันระดับน้ำทะเลปานกลาง (๑๔.๗ psi หรือ ๗๕ ซม.ปรอท) โดยที่เกจวัดของเครื่องมือชนิดนี้จะอ่านค่าได้เท่ากับ ๐ psig

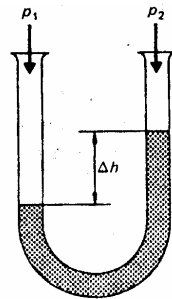
๒. **Absolute pressure sensor** คือเซ็นเซอร์ที่ใช้ค่ากำลังดันอ้างอิงที่ความดันสูญญากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ๑๔.๗ psia

นอกจากเครื่องมือวัดความดันสองชนิดที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเครื่องมือวัดความดันอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า **Differential pressure sensor** ซึ่งใช้หลักการเปรียบเทียบความดันที่แตกต่างกันของระดับของเหลวที่ต่างกันสองด้าน

เครื่องมือวัดความดัน สามารถแบ่งประเภทการใช้งานได้เป็น ๒ ประเภท คือ ๑.เครื่องมือวัดความดันโดยแสดงผลอยู่ในรูปของค่าตำแหน่ง เช่น Manometer, Bourdon Tube, Bellows และ Diaphragm ๒. เครื่องมือวัดความดันโดยแสดงผลอยู่ในรูปของค่าไฟฟ้ากระแสตรง เช่น Piezoresistive transducer

Manometer

เป็นเครื่องมือวัดความดันที่เป็นต้นแบบของการพัฒนามีลักษณะเป็นหลอดแก้วรูปตัวยู ภายในบรรจุด้วยของเหลว เช่น น้ำ หรือ แอลกอฮอล์ เป็นต้น หลักการของเครื่องมือวัดชนิดนี้คือ ปลายด้านหนึ่งจะใส่ไว้ในส่วนที่ต้องการวัดความดัน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะเปิดสู่บรรยากาศหรืออยู่ในความดันอ้างอิงที่กำหนด ที่ความดันปกติระดับของเหลวที่ปลายทั้งสองข้างจะเท่ากัน แต่เมื่อใดที่ความดันด้านใดด้านหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ระดับของของเหลวเปลี่ยนแปลงไปด้วย (ดังแสดงในรูปที่ ๑)



รูปที่ ๑. เครื่องมือวัดความดันแบบ Manometer

สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ ดังนี้คือ

$$\Delta h = \frac{P_1 - P_2}{W_m}$$

เมื่อ Δh คือ ระดับความแตกต่างของ ๗ เหลวที่ปลายหลอดแก้วทั้งสองข้าง

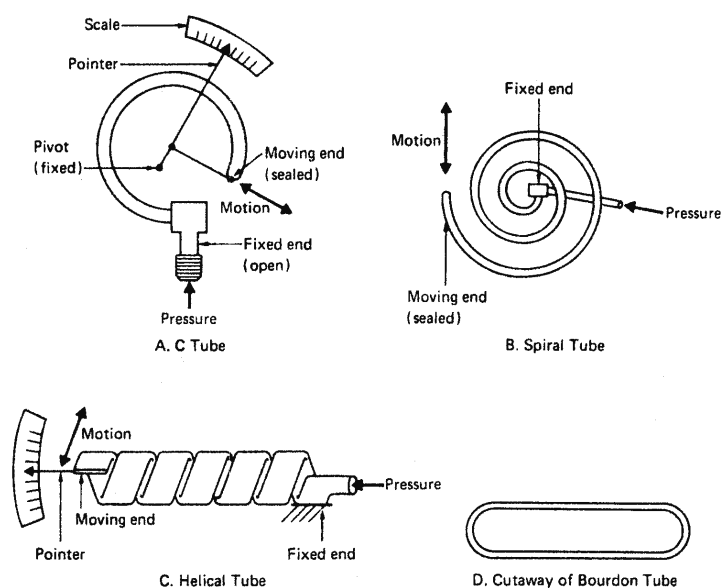
P_1 คือ ความดันปลายข้างที่วัดค่า

P_2 คือ ความดันชั้นบรรยากาศหรือความดันอ้างอิงที่กำหนด

W_m คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลวที่ใส่ในหลอดแก้ว

Bourdon tube

เป็นเครื่องมือวัดความดันที่เก่าแก่ยังคงมีใช้อยู่จนถึงปัจจุบันนี้ รูปแบบพื้นฐานของ Bourdon tube แบ่งออกเป็น ๓ ชนิด คือ แบบ C tube, Spiral tube และ Helical tube (ดังแสดงในรูปที่ ๒)

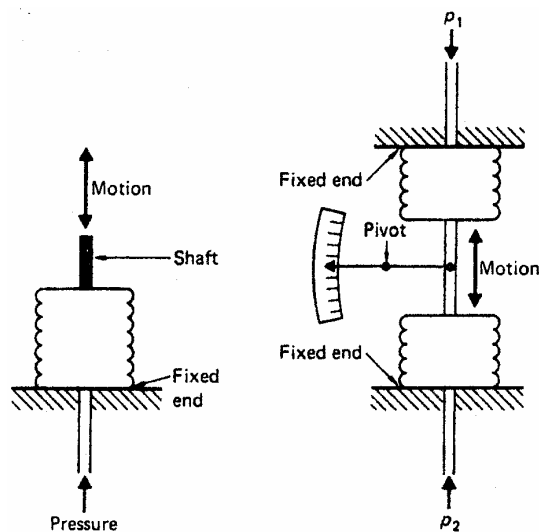


รูปที่ ๒. Bourdon ชนิดต่าง ๆ

โครงสร้างของเครื่องมือชนิดนี้จะเหมือนกัน คือ ปลายด้านหนึ่งจะเปิดเพื่อให้ของเหลวที่ต้องการวัดสามารถไหลผ่านเข้าไปได้ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะปิดและติดกับเข็มชี้ หลักการทำงาน จะให้กำลังดันของของเหลวที่ต้องการวัดเข้าไปในหลอดโลหะซึ่งจะดันให้หลอดโลหะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง หลอดโลหะส่วนใหญ่ทำมาจาก ทองเหลือง, ฟอสเฟอร์บรอนซ์ หรือ เหล็ก เป็นต้น เครื่องมือวัดความดันชนิดนี้ นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีราคาถูก มีความถูกต้องแม่นยำสูง สามารถใช้วัดความดันได้สูงถึง 100,000 psi (700,000 kPa) โดยแบบ C tube จะมีค่าการตอบรับช้าที่สุด และแบบ Helical tube จะมีการตอบสนองต่อความดันเร็วที่สุด อาการตอบสนองของเครื่องมือวัดความดันดังกล่าวจะเป็นแบบแอนะล็อก (Analog signal) สามารถที่จะทำการเปลี่ยนสัญญาณให้เป็นแบบไฟฟ้าได้ง่าย โดยใช้งานร่วมกับ อุปกรณ์เสริม เช่น potentiometer และ LVDT เป็นต้น สำหรับข้อเสียของเครื่องมือวัดความดันชนิดนี้คือ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้วัดความดันที่ต่ำกว่า 50 psi (750 kPa)

Bellow

เครื่องมือวัดชนิดนี้มีลักษณะเป็นลูกสูบที่สามารถขยายตัวได้ (ดังแสดงในรูปที่ ๓)

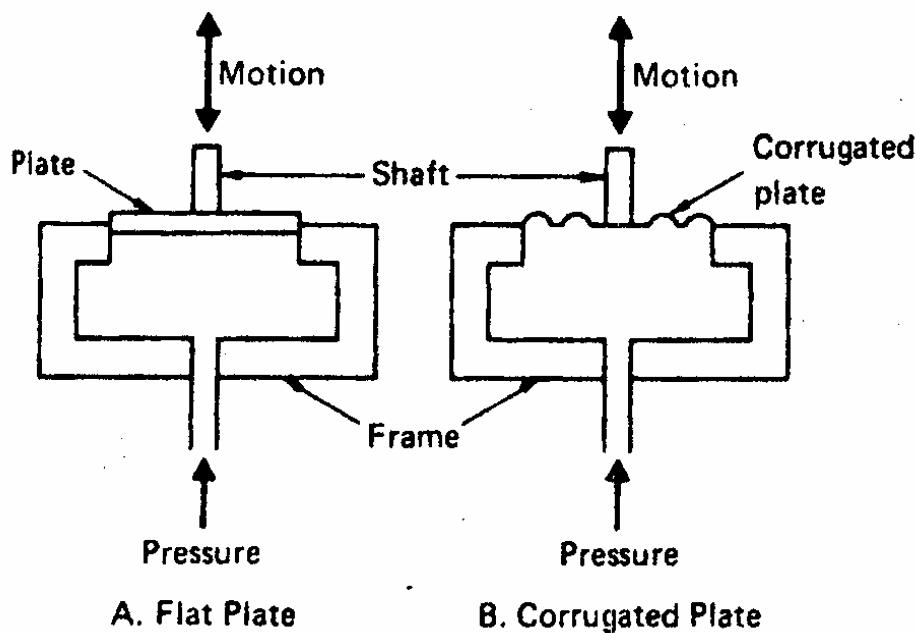


รูปที่ ๓. เครื่องมือวัดความดันแบบ Bellow

โดยรูปทางด้านซ้าย เป็นแบบมาตรฐานทั่วไป หลักการทำงาน คือความดันของของเหลวจะเข้าไปดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ โดยปลายอีกด้านหนึ่งของลูกสูบ ยึดติดกับแกนเพลลาที่ส่งอาการให้สัมพันธ์กับเครื่องมือวัด ส่วนรูปทางด้านขวา เป็นแบบวัดความแตกต่าง มีหลักการทำงานคล้ายแบบแรก คือ กำลังดันจะเข้าไปดันลูกสูบทั้งสองด้านที่ยึดติดกันด้วยเพลลา จะมีเข็มติดอยู่ที่เพลลาของเครื่องมือวัด โดยที่ด้านใดได้รับความดันสูงกว่าก็จะเลื่อนไปในทางด้านความดันน้อยกว่า เครื่องมือวัดชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้วัดความดันที่อยู่ในช่วง 0 – 30 psi (0.210 kPa)

Diaphragm

เครื่องมือวัดที่ปัจจุบันมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายมาก โดยใช้หลักการของความดันของของเหลวเข้ามาระกระทำต่อแผ่น Diaphragm ซึ่งแผ่น Diaphragm นี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง อาจทำมาจากโลหะหรือแผ่นยาง ที่สามารถเกิดการยืดหยุ่นได้และจะส่งผลทำให้ก้านต่อ (Shaft) เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลง (ดังแสดงในรูปที่ ๔)

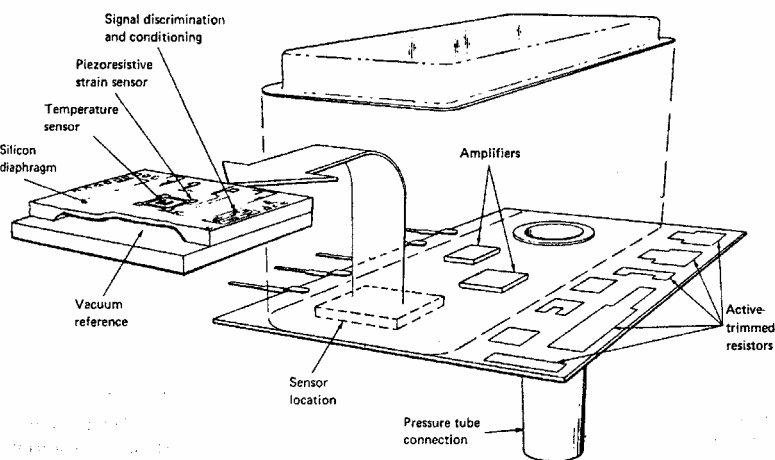


รูปที่ ๔. แบบของ Diaphragm ทั้ง ๒ ชนิด

สำหรับรูปแบบของ Diaphragm แบ่งออกเป็น ๒ ชนิด คือ แบบแผ่นเรียบ (flat plate) และแบบแผ่นไม่เรียบ (Corrugated plate) โดยแบบแผ่นไม่เรียบจะมีการตอบสนองต่อความดันได้ดีกว่าเครื่องมือวัดความดันชนิดนี้เหมาะที่จะนำมาใช้วัดความดันในช่วง 0 – 15 psi (0 – 105 kPa)

Piezoresistive Transducers

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความดันอีกชนิดหนึ่งทำมาจากผลึกที่มีผลการตอบสนองที่เรียกว่า Piezoelectric นำมาทำการขึ้นรูป ผลึกที่ได้นี้จะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับผลึกจำพวกที่ใช้ทำ Semiconductor ในการนำมาใช้งานมักจะมีส่วนประกอบของเครื่องมือวัดอุณหภูมิประกอบอยู่ในวงจรด้วย ช่วงการใช้งานจะอยู่ช่วงความดัน 10 – 5000 psi (70 – 35,000 kPa) เครื่องมือวัดความดันชนิดนี้จะมีความเร็วในการตอบสนองที่ดีมากและให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นเกือบเป็นเส้นตรงทีเดียว



รูปที่ ๕. Piezoresistive Transducers

เครื่องมือวัดอัตราการไหล

การวัดอัตราการไหลส่วนใหญ่จะใช้วัดกับของเหลว ใส น้ำ และแก๊สต่าง ๆ ในส่วนของเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการไหลของของไหลนั้นสามารถแบ่งตามลักษณะการวัด ออกเป็น ๒ ชนิดใหญ่ ๆ คือ

๑. แบบวัดปริมาณ (Quantity Devices) เป็นการวัดปริมาณของของเหลวที่ไหลผ่านจุดที่กำหนด
๒. แบบวัดอัตราการไหล (Rate of flow Devices) เป็นการวัดความเร็วของของเหลวที่ไหลผ่านจุดที่กำหนดภายในช่วงเวลาใด

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของของเหลวมีอยู่หลายแบบ เช่น Differential pressure, Variable area, Positive-displacement, Velocity และ Thermal heat mass

Differential Pressure

เป็นเครื่องมือวัดอัตราเร็วของการไหลของของเหลวที่นิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป หลักการโดยทั่วไปในการวัดคือ จะใช้หลักการของ Bernoulli effect ร่วมกับกฎทรงตัวของพลังงานและมวล (ปริมาณของเหลวที่เข้าสู่ระบบ จะมีค่าเท่ากับของเหลวที่ออกจากระบบ) และกฎความเร็วในการไหล (ความเร็วของของเหลวที่ไหลผ่านที่แคบหรือเล็กจะมีความเร็วมากกว่าไหลผ่านที่กว้าง) สำหรับเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบนี้ที่นิยมกันมากจะมีอยู่ ๕ ชนิด คือ Orifice plate, Venturi tube, Flow nozzle, Dall tube และ Elbow

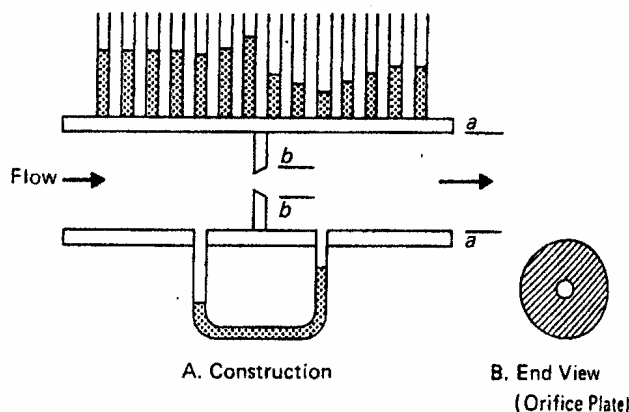
๑.๑ Orifice Plate เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลโดยจะทำการเป็นแผ่นโลหะเจาะรูแล้วไปวางกั้นการไหลแบบแรก (ดังแสดงในรูปที่ ๖) หลักการทำงาน คือเมื่อของเหลวไหลในที่แคบจะทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นแต่กำลังดันลดลง ดังนั้นกำลังดันของของเหลวก่อนผ่านรูของแผ่นกั้นจะแตกต่างกับกำลังดันหลังจากที่ผ่านรูแผ่นกั้นแล้ว (กำลังทางออกลดลงอย่างมาก แต่ความเร็วจะเพิ่มขึ้นมาก) สำหรับการอ่าน

ค่าความเร็วสามารถอ่านได้จาก ระดับของเหลวในหลอดแก้วของมาโนมิเตอร์ โดยดูผลต่างของระดับของเหลว เนื่องจากว่าหลอดแก้วจะมีปลายเปิดทั้งสองด้าน โดยจะยอมให้ความดันของของเหลวเข้ามามีผลเปรียบเทียบกับกัน ผลต่างของระดับจะขึ้นกับผลต่างของความดันก่อนและหลังจากที่ผ่านแผ่นกัน

อัตราการไหลผ่าน Orifice plate สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ ดังนี้

$$Q = \left(\frac{\pi}{4} \left(\frac{d_b}{d_a} \right)^2 (K)(2gd)^{\frac{1}{2}} \right)$$

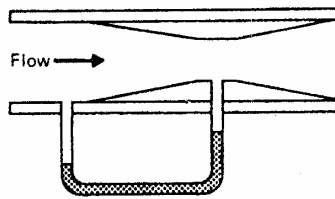
เมื่อ	Q	คือ	อัตราการไหลของของเหลว
	d_b	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูของแผ่นกัน
	d_a	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเครื่องมือวัด
	K	คือ	ค่าคงที่ของการไหล (flow coefficient)
	g	คือ	ความเร่ง (32 ft/s ²)
	d	คือ	ค่าความแตกต่างของระดับของเหลวที่ปลายทั้งสองของมาโนมิเตอร์



รูปที่ ๖ Orifice Plate

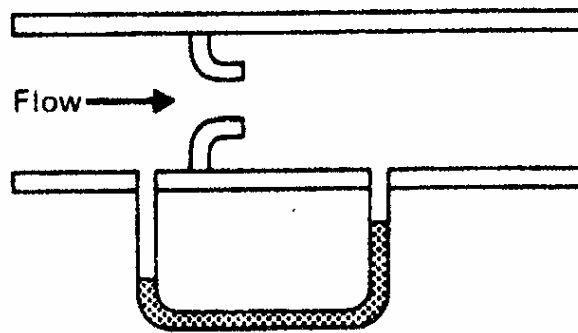
เครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดนี้นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีโครงสร้างง่ายต่อการใช้งาน ราคาถูก ติดตั้งง่าย แต่มีข้อเสีย คือ มีค่าความถูกต้องค่อนข้างน้อย ยานการวัดจำกัด และไม่สามารถใช้วัดอัตราการไหลของ ๑ เหลวที่มีสารตกตะกอนจำพวกของแข็งปนอยู่ด้วยได้

๑.๒ Venturi Tube เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลอีกชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง โดยมีหลักการการทำงานคล้ายกับแบบ Orifice plate แต่มีข้อแตกต่างกัน คือ ภายในจะมีท่อลดขนาดมาใช้แทนแผ่นกัน เจาะรู ทำให้สามารถกำหนดมุมให้มีการลาดเอียงได้ ซึ่งสามารถลดการเกิดการไหลแบบแปรปรวน (Turbulence) ได้มากกว่าแบบ Orifice plate และยังสามารถใช้วัดอัตราการไหลของสารแขวนลอยได้ เนื่องจากจะไม่ประสบปัญหาการที่ตะกอนหรือเศษวัสดุอุดตันได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือราคาค่อนข้างแพง และการติดตั้งต้องมีค่าใช้จ่ายสูง



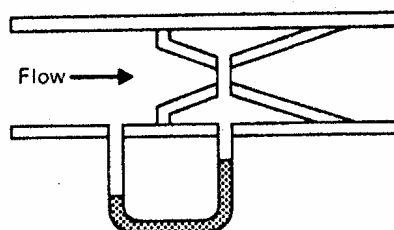
รูปที่ ๗ Venturi Tube

๑.๓ Flow Nozzle เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่พัฒนาขึ้นโดยจะมีรูปร่างคล้ายกับ ๒ แบบที่กล่าวมาแล้ว แต่ท่อที่ให้ของเหลวไหลผ่านจะทำมุมให้โค้งมน ทำให้สามารถวัดอัตราการไหลได้ถูกต้องมากกว่าแบบ Orifice plate ถึง ๕๐% นอกจากนี้ค่าสูญเสียของความดันน้อยและราคาเครื่องมือต่ำ (ดังแสดงในรูปที่ ๘)



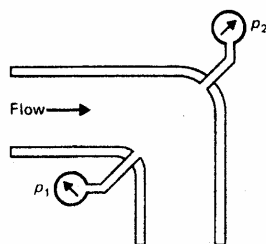
รูปที่ ๘ Flow Nozzle

๑.๔ Dall tube เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่ทำให้เกิดการสูญเสียความดันเนื่องจากรูปร่างของเครื่องมือที่น้อยที่สุด สำหรับโครงสร้างจะประกอบด้วยท่อที่มีลักษณะเป็นแบบรูปกรวย (Cones) ที่มีรูตรงกลางแต่มีขนาดต่างกันจำนวน ๒ ท่อ ท่อทั้งสองจะหันปลายส่วนเล็กเข้าหากัน ส่วนท่อที่เล็กกว่าจะอยู่ทางด้านที่ของเหลวไหลเข้า (ดังรูปที่ ๙) ข้อดีของเครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดนี้ คือ ราคาถูกและค่าการติดตั้งต่ำกว่าแบบ Venturi tube แต่ประสิทธิภาพในการวัดอัตราการไหลน้อยกว่า Venturi tube



รูปที่ ๙ Dall tube

๑.๕ Elbow เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลของของเหลวแบบ Differential pressure meter แต่จะมีหลักการแตกต่างจากแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว คือ จะไม่ใช่คุณสมบัติการไหลแบบราบเรียบ (Bernoulli effect) แต่จะวัดความดันบริเวณส่วนที่เป็นข้อของเครื่อง (ดังรูปที่ ๕)

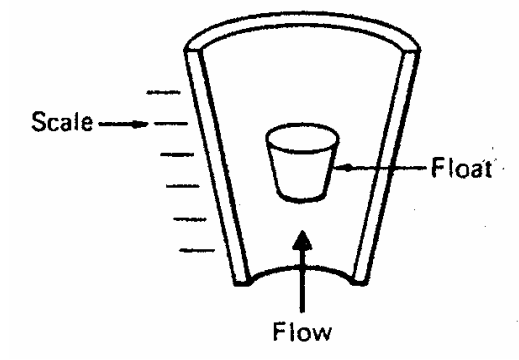


รูปที่ ๕. Elbow

จากรูป ความดันที่ข้อทางด้านนอก (p_2) จะมีค่ากำลังดันมากกว่าข้อด้านใน (p_1) ข้อดีของเครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดนี้คือ จะไม่มีการสูญเสียของความดันในท่อเลย เนื่องจากขนาดท่อของเครื่องมือมีขนาดคงที่ตลอด ส่วนข้อเสีย คือ จะให้ค่าความถูกต้องคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm 5\%$

๒. Variable-Area Flow meter

เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีรูปร่างเป็นท่อกรวย ประกอบด้วยลูกลอยขนาดเล็กลอยอยู่ในท่อนี้ ด้านข้างท่อจะมีมาตรวัดกำหนดไว้โดยจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการไหล หลักการทำงานคือ ให้ของเหลวไหลเข้าส่วนที่แคบ เมื่อมีของเหลวไหลเข้าภายในก็จะทำให้ลูกลอยนั้นลอยขึ้น-ลงได้ ความเร็วของการไหลจะสัมพันธ์กับพื้นที่ โดยบริเวณที่มีพื้นที่มาก (ปากกรวย) จะทำให้ความเร็วในการไหลลดลง เครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดนี้เรียกว่า Rotameter โดยทั่วไปไม่นิยมนำเครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดนี้มาใช้งานร่วมกับระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ

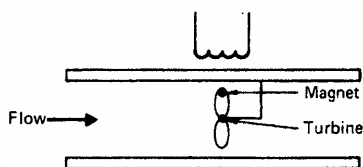


รูปที่ ๖ Rotameter

๓. Velocity flowmeter

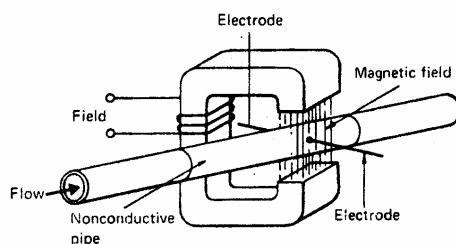
Velocity flow meter หรือบางครั้งเรียกว่า Volumetric rate flowmeter ซึ่งจะให้ค่าสัญญาณทางออกเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความเร็วยของของเหลวในการไหล สำหรับเครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดนี้จะมีแบบที่นิยมใช้งาน ๓ แบบ คือ แบบกังหัน (turbine), แบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) และแบบกำหนดจุดเป้าหมาย (target)

๓.๑ Turbine flowmeter จะมีลักษณะเป็นใบพัดน้ำ (ใบจักร) ที่มีส่วนประกอบของแม่เหล็กผสมอยู่ด้วย นำไปประกอบอยู่ในท่อทางที่ให้ของเหลวไหลผ่าน เมื่อใดที่มีของเหลวไหลผ่านก็จะทำให้ใบพัดเกิดการหมุนและผลจากการหมุนของใบพัดจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (นำไปใช้แสดงค่าหรือเปรียบเทียบ) สำหรับข้อดีของเครื่องมือวัดอัตราการไหล คือ จะให้ค่าความถูกต้องแม่นยำ ยานการวัด และมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลของของเหลวกับอัตราการหมุน (เป็นลักษณะเส้นตรง) ที่ดีมาก



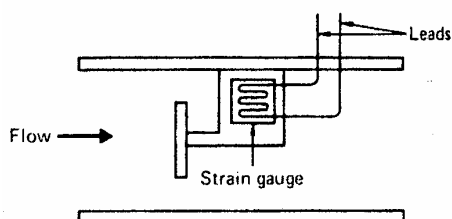
รูปที่ ๗ Velocity flowmeter

๓.๒ Electromagnetic flowmeter เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่ใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลักการเครื่องมือวัดอัตราการไหลนี้ คือ การให้ของเหลว (มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี) ไหลภายในท่อที่ไม่ใช่ตัวนำไฟฟ้า โดยภายในท่อจะมีแท่งโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นขั้วอิเล็กโตรด (Electrode) ที่ดีใส่กันไว้ในท่อโดยวางอยู่บริเวณแนวเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก (ดังรูปที่ ๘) เมื่อใดที่มีของเหลวไหลผ่านจะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กโตรดที่แท่งอิเล็กโตรดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นภายในขดลวดตัวนำ กระแสไฟฟ้านี้จะไปติดกับสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้เป็นส่วนแสดงผล ข้อดี ของเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบนี้จะมีค่าการสูญเสียของกำลังดันภายในท่อน้อยมาก



รูปที่ ๘ Electromagnetic flowmeter

๓.๓ Target flowmeter Target flowmeter (ดังแสดงในรูปที่ ๙) ใช้หลักการของการขวางกั้นการไหลทำให้การไหลไม่สะดวก ซึ่งจะส่งผลให้กำลังดันทางออกลดลงโดยเป็นสัดส่วนกับความเร็วของการไหล สำหรับแรงดันที่กระทำกับตัวกัน (target) นี้จะส่งอาการผ่านส่วนที่เรียกว่า Strain gauge เพื่อส่งค่าแสดงผลต่อไป



รูปที่ ๙ Target flowmeter

๔. Thermal Heat Mass flowmeters

Thermal heat mass flowmeter เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่ให้ค่าความถูกต้องสูง หลักการทำงาน คือ ให้ความร้อนแก่ของเหลวที่ไหลแล้วใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปโดยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหล ข้อดีของเครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดนี้ คือ จะไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นเลย