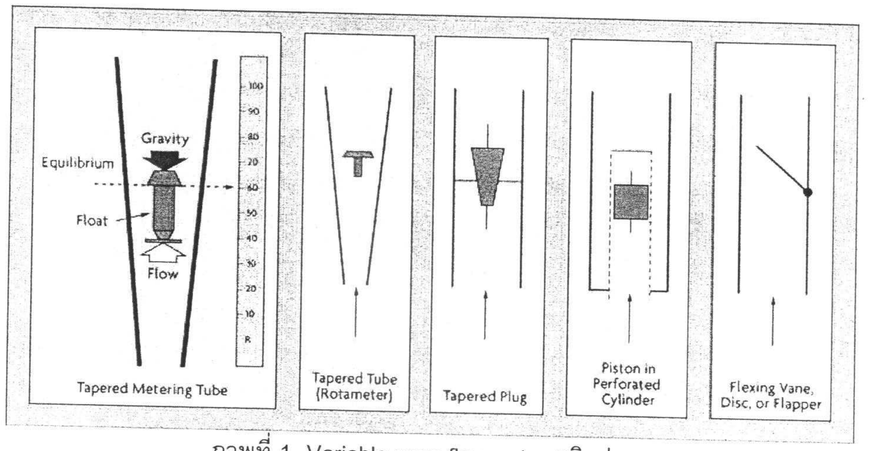
ROTAMETER การทำงานและการคำนวณ

ภราดร เสถียรไชยกิจ*

Rotameter เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการไหลชนิด Variable area flowmeter แบบหนึ่งได้ถูกคิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นในช่วงต้นของศตวรรคที่ 19 แต่ในระยะแรกไม่เป็นที่แพร่หลาย จนในช่วงปี ค.ศ.1930 Rotameter ได้รับความนิยมจากวงการอุตสาหกรรมทั่วไป เพราะมีราคาถูกกว่าเครื่องมือวัดการไหลแบบใช้ความดันแตกต่าง (Differential pressure flowmeter) หรือ แบบ Orifice โดยในยุคแรก สามารถอ่านค่าอัตราการไหลได้โดยตรงจากสเกลที่ตัวมิเตอร์ ต่อมาในช่วงปี ค.ศ.1940 ได้มีการออกแบบให้การอ่านสเกลเป็นแบบใช้เข็ม แล้วพัฒนาต่อมาให้มีสัญญาณเตือน ปัจจุบันสามารถบันทึกปริมาณการไหล รวมทั้งการคิดปริมาณการไหลรวมทั้งหมดได้



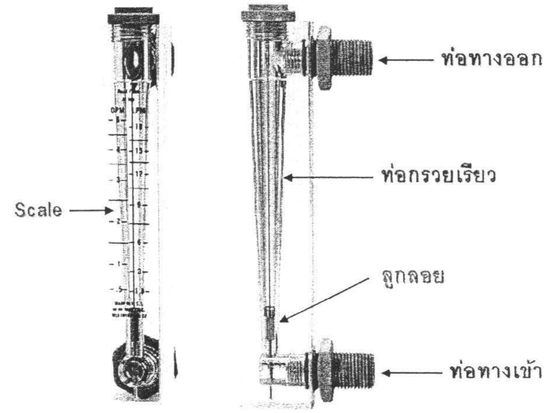
ภาพที่ 1 Variable area flowmeter ชนิดต่างๆ

หลักการในการทำงาน

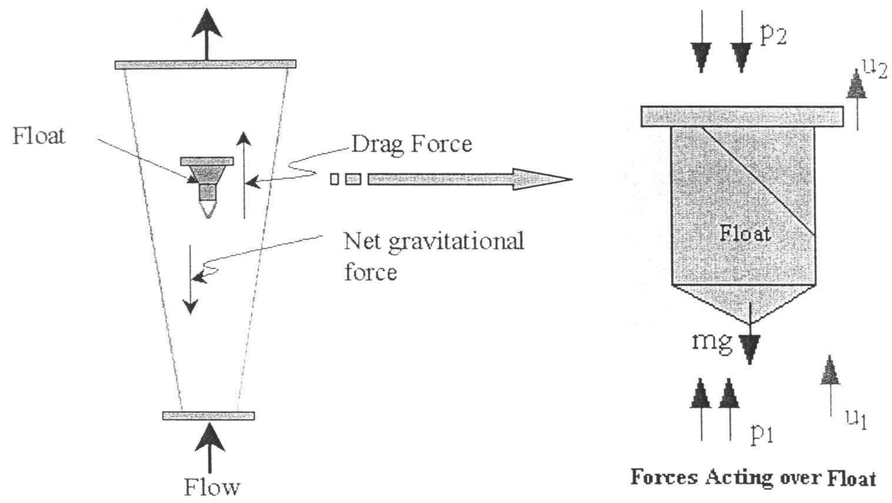
ตัวมิเตอร์เป็นท่อใสซึ่งด้านในเป็นรูปกรวยเรียว (Tapered pipe) และมีลูกลอย (Float) ที่ออกแบบพิเศษบรรจุอยู่ภายใน ของไหลที่ต้องการวัดจะไหลผ่านเข้ามาทางด้านล่างของตัวมิเตอร์ ลูกลอยจะถูก Velocity head ยกให้ลอยตัวขึ้น ตำแหน่งของลูกลอยจะลอยนิ่งอยู่กับที่เมื่อเกิดความสมดุลย์ระหว่าง Velocity head ของของไหลกับน้ำหนักของลูกลอย เมื่อลูกลอยลอยสูงขึ้น พื้นที่หน้าตัดของท่อที่ให้ของไหลไหลผ่านก็จะมีขนาดมากขึ้น เป็นการรักษาความดันตกคร่อมในตัวมิเตอร์ให้คงที่ เนื่องจาก Velocity head กับอัตราการไหลจะแปรเปลี่ยนไปตามกัน ดังนั้นตำแหน่งของลูกลอยจะสามารถบอกค่าอัตราการไหลได้

---

* นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาเทคโนโลยีเทคนิคศึกษา ภาควิชาครุศาสตร์เทคโนโลยี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



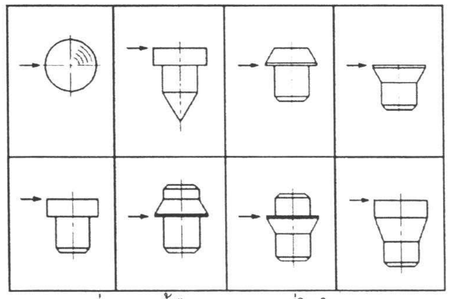
ภาพที่ 2 ลักษณะทั่วไปของ Rotameter



ภาพที่ 3 หลักการทำงานของ Rotameter

ส่วนประกอบของ Variable Area Flowmeter

ลูกลอย (Float) ลักษณะของลูกลอยจะถูกออกแบบตามคุณสมบัติและปริมาณการไหลของของไหล เช่น แบบลูกบอลจะเหมาะสำหรับอัตราไหลไม่มาก บางแบบเหมาะสำหรับของไหลที่มีค่าความหนืดสูง,ต่ำ หรือต้องการให้มีความดันสูญเสียต่ำ เป็นต้น

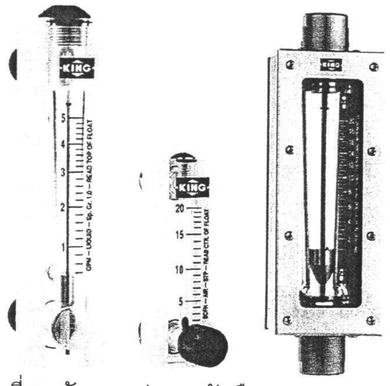


(ตำแหน่งที่ลูกศรชี้คือตำแหน่งที่ใช้ในการอ่านค่า)

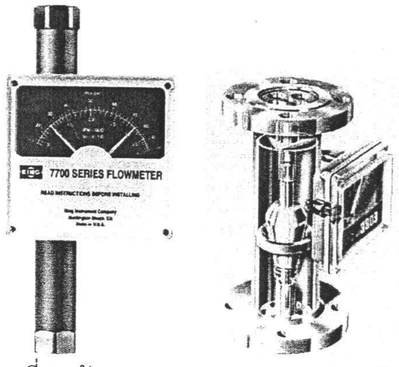
ภาพที่ 4 ลักษณะของลูกลอย

ท่อใส จะที่ใช้ทำตัวเรือนของมิเตอร์วัดส่วนใหญ่ทำจาก “โบโรซิลิเกจ” หรือ PVC ชนิดใส โดยปกติไม่นิยมใช้ท่อแก้วเพราะจะเกิดการแตกหักได้ง่าย เนื่องจากมีวัตถุอื่นกระแทก หากจำเป็นต้องใช้ท่อแก้วส่วนมากจะมีตัวเรือนป้องกันการกระแทกอยู่ด้านนอก

ท่อโลหะ ใช้สำหรับงานในจุดที่ใช้ท่อใสไม่ได้ วิธีการอ่านค่าจึงต้องแตกต่างออกไปเพราะไม่สามารถมองดูลูกลอยได้โดยตรง โดยจะมีก้านต่อจากลูกลอยผ่านกลไกแล้วแสดงค่าที่หน้าปัดของเครื่องมือวัด

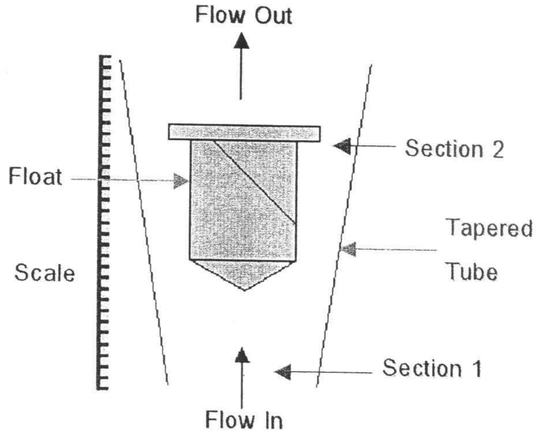


ภาพที่ 5 ลักษณะท่อและตัวเรือนของ Rotameter



ภาพที่ 6 ลักษณะของ Rotameter ชนิดท่อโลหะ

สมการที่ใช้ในการออกแบบ



ภาพที่ 7 พื้นฐานในการออกแบบ Rotameter

เมื่อ

V_1 = ความเร็วของของไหล Section ที่ 1

V_2 = ความเร็วของของไหล Section ที่ 2

g = ค่าแรงโน้มถ่วง

h_1 = ความสูงของ Section ที่ 1

h_2 = ความสูงของ Section ที่ 2

P_1 = ความดันของ Section ที่ 1

P_2 = ความดันของ Section ที่ 2

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

Q = อัตราการไหล (เชิงปริมาตร)

W = อัตราการไหล (เชิงน้ำหนัก)

A_2 = เป็นพื้นที่หน้าตัด Section ที่ 2

C = ค่าคงที่ (Coefficient of Discharge)

จากสมการ Bernoulli's

$$V_2^2 - V_1^2 = 2g \cdot (h_1 - h_2) \quad (1)$$

พิจารณาการสูญเสียของ Hydraulic head

$$h_1 - h_2 = \frac{P_1 - P_2}{P} \quad (2)$$

จากสมการการไหลต่อเนื่อง

$$W = A_2 \cdot V_2 \cdot \rho \quad (3)$$

เมื่อค่า C เป็นค่า Coefficient of Discharge

$$W = C \cdot A_2 \cdot V_2 \cdot \rho \quad (4)$$

จากสมการที่ (1) V_1 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ V_2 ดังนั้น

$$V_2^2 = 2g \cdot (h_1 - h_2) \quad (5)$$

แทนค่าสมการที่ (2) ลงในสมการที่ (5)

$$V_2^2 = 2g \cdot (P_1 - P_2) \quad (6)$$

แทนค่าสมการที่ (6) ลงในสมการที่ (4)

$$W = C \cdot A_2 \sqrt{2g \cdot (P_1 - P_2) \cdot \rho} \quad (7)$$

จากสูตรการหาอัตราการไหลในเชิงปริมาตร

$$Q = \frac{W}{\rho} \quad \text{และ} \quad W = Q \cdot \rho \quad (8)$$

แทนค่าสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (7)

แทนค่าสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (7)

$$Q = C \cdot A_2 \frac{\sqrt{2g \cdot (P_1 - P_2)}}{\sqrt{\rho}} \quad (9)$$

จากแรงลอยตัวที่กระทำกับลูกลอย

$$P_1 - P_2 = \frac{W_f \dfrac{(\rho_f - \rho)}{\rho_f}}{\dfrac{\pi \cdot D_f^2}{4}} \quad (10)$$

เมื่อ

W_f = น้ำหนักของลูกลอย

D_f = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกลอย

ρ_f = ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำลูกลอย

แทนค่าสมการที่ (10) ลงในสมการที่ (7) และ(9)

$$W = C \cdot A_2 \frac{\sqrt{2g \cdot \rho \cdot W_f (\rho_f - \rho)}}{\sqrt{\rho_f}} \quad (11)$$

และ

$$Q = C \cdot A_2 \frac{\sqrt{2g \cdot W_f (\rho_f - \rho)}}{\sqrt{\rho \cdot \rho_f}} \quad (12)$$

ดังนั้นจึงใช้สมการที่ 11 และ 12 เป็นสูตรในการออกแบบ Rotameter ที่ใช้วัดอัตราการไหลของของไหลชนิดต่าง ๆ โดยสามารถพิจารณาได้ทั้งในกรณีของการวัดอัตราการไหลเชิงน้ำหนัก ในสมการที่ 11 และการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร ในสมการที่ 12

การหาค่าอัตราการไหลในกรณีที่ของไหลเปลี่ยนชนิดไป

โดยปกติการออกแบบ Rotameter ของไหลที่ใช้ในการคำนวณขนาดของท่อ และรูปร่างของลูกลอยจะใช้อากาศและน้ำเป็นหลัก และที่ตัวของ Rotameter จะระบุว่ามิเตอร์ตัวนี้ถูกออกแบบให้วัดของไหลชนิดใดโดยเฉพาะ หากนำไปวัดอัตราการไหลของไหลชนิดอื่น ค่าที่ได้อาจคลาดเคลื่อนได้ เพราะความถ่วงจำเพาะของของไหลแต่ละชนิดไม่เท่ากันแต่ในกรณีที่จำเป็น จะสามารถหาค่าอัตราการไหลได้จากสมการดังต่อไปนี้ กรณีวัดอัตราการไหลของของเหลว

จากสูตร

อัตราการไหลจริง = ค่าที่อ่านได้ × สัมประสิทธิ์ในการแปลงค่า

เมื่อ

$$C_V = \sqrt{\frac{\rho_d \cdot (\rho_f - \rho)}{\rho \cdot (\rho_f - \rho_d)}}$$

กำหนดให้

C_V = สัมประสิทธิ์ในการแปลงค่า

ρ_d = ความหนาแน่นของของไหลที่ใช้ในการออกแบบ $\left(kg/m^3\right)$

ρ = ความหนาแน่นของของไหลที่ทำการวัด $\left(kg/m^3\right)$

ρ_f = ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำลูกลอย $\left(kg/m^3\right)$

ตัวอย่าง

ข้อมูลในการออกแบบเครื่องมือวัด

ของไหล : น้ำ, ความหนาแน่น : 1000 kg/m^3 , วัสดุที่ใช้ทำลูกลอย : Stainless steel, ความหนาแน่น : 7700 kg/m^3

ข้อมูลในการใช้งานจริง

ของไหล : Alcohol, ความหนาแน่น : 800 kg/m^3 , ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด : 10 m^3/h

จากสูตร

$$C_V = \sqrt{\frac{\rho_d \cdot (\rho_f - \rho)}{\rho \cdot (\rho_f - \rho_d)}}$$

แทนค่า

$$C_V = \sqrt{\frac{1000 \cdot (7700 - 800)}{800 \cdot (7700 - 1000)}}$$

$$C_V = 1.134$$

$\therefore$ อัตราการไหลจริง = 10 m^3/h × 1.134 = 11.34 m^3/h

ตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำลูกลอย

วัสดุที่ใช้ทำลูกลอย	ความหนาแน่น $\left(kg \cdot 10^3/m^3\right)$	วัสดุที่ใช้ทำลูกลอย	ความหนาแน่น $\left(kg \cdot 10^3/m^3\right)$
Dowmetal	1.80	316 SS (Stainless)	8.02
Teflon	2.20	ทองเหลือง	8.46
กระเบื้อง (Porcelain)	2.41	Everdur	8.54
แก้ว (Glass)	2.45	Monel	8.80
PVC.	2.70	*Bronze*	8.80
Aluminum	2.79	Nickel	8.85
Sapphire	3.99	Hastelloy C.	8.94
Titanium	4.50	Hastelloy B.	9.24
Stainless steel	7.70	Lead (10% antimony)	10.67
Steel	7.8	Carboloy	15.00
Durimet	8.02	Tantalum	16.60

ที่มา : การใช้งานเครื่องมือวัด:2540 และ www.tokyokeiso.co.jp

กรณีวัดอัตราการไหลของแก๊ส

ในกรณีการวัดอัตราการไหลของแก๊ส มีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง 3 ประการคือ

1. ความหนาแน่นของแก๊สที่ทำการวัด (ภายใต้สภาวะปกติที่ $0^{\circ C}$ และความดัน 1 atm)
2. ความดันใช้งาน
3. อุณหภูมิใช้งาน

จากสูตร

อัตราการไหลจริง = ค่าที่อ่านได้ × สัมประสิทธิ์ในการแปลงค่า

แต่ สัมประสิทธิ์ในการแปลงค่า = ผลคูณของสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่น , ความดัน , อุณหภูมิ

การหาสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่น

เมื่อ

$$C_\rho = \sqrt{\frac{\rho_d}{\rho}}$$

กำหนดให้

C_ρ = สัมประสิทธิ์ในการแปลงค่าความหนาแน่น

ρ_d = ความหนาแน่นของของไหลที่ใช้ในการออกแบบ $\left(kg/m^3\right)$

ρ = ความหนาแน่นของของไหลที่ทำการวัด $\left(kg/m^3\right)$

ตารางที่ 2 ค่า Density , Viscosity และ Specific Gravity ของแก๊สบางชนิด

Gas	Density $\left(g/ml\right)$	Viscosity (centipols)	Sp. Gr. G(air = 1.0)	Gas	Density $\left(g/ml\right)$	Viscosity (centipols)	Sp. Gr. G(air = 1.0)
Acetylene	0.001090	0.00988	0.9073	Helium	0.0001656	0.01980	0.13804
Air	0.001200	0.01812	1.0000	Hydrogen	0.0000834	0.00885	0.06952
Ammonia	0.000716	0.00994	0.5963	Hydrogen chloride	0.001512	0.01560	1.2678
Argon	0.001660	0.02220	1.3796				
Butane	0.002484	0.00848	2.0854	Methane	0.0006653	0.01099	0.5544
Carbon dioxide	0.001835	0.01470	1.5290	Nitrogen	0.001160	0.01756	0.96724
Carbon monoxide	0.001163	0.01750	0.9671	Nitrogen oxide	0.001833	0.01453	1.5297
Chlorine	0.002983	0.01330	2.4860	Oxygen	0.001326	0.02030	1.10527
Ethane	0.001260	0.00901	1.0493	Propane	0.001874	0.00805	1.5620
Ethylene	0.001170	0.00994	0.9749	Sulfur dioxide	0.002717	0.01270	2.2638

ที่มา : www.aalborg.com

การหาสัมประสิทธิ์ของความดัน

เมื่อ

$$C_P = \sqrt{\frac{P + 0.1013}{P_d + 0.1013}}$$

กำหนดให้

C_P = สัมประสิทธิ์ในการแปลงค่าความดัน

P_d = ความดันของของไหลที่ใช้ในการออกแบบ ($MPa.$)

P = ความดันของของไหลที่ทำการวัด ($MPa.$)

การหาสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

เมื่อ

$$C_t = \sqrt{\frac{t_d + 273}{t + 273}}$$

กำหนดให้

C_t = สัมประสิทธิ์ในการแปลงค่าอุณหภูมิ

t_d = อุณหภูมิของของไหลที่ใช้ในการออกแบบ ($^{\circ}C$)

t = อุณหภูมิของของไหลที่ทำการวัด ($^{\circ}C$)

ตัวอย่าง

ข้อมูลในการออกแบบเครื่องมือวัด

ของไหล : อากาศ, ความหนาแน่น : 1.293 kg/m^3 , ความดัน : 0.2 $MPa.$, อุณหภูมิ : $20^{\circ C}$

ข้อมูลในการใช้งานจริง

ของไหล : CO_2, ความหนาแน่น : 1.977 kg/m^3 , ความดัน : 0.4 $MPa.$, อุณหภูมิ : $40^{\circ C}$

ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด : 5 m^3/h

จากสูตรการหาสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่น

$$C_\rho = \sqrt{\frac{\rho_d}{\rho}}$$

แทนค่า $$C_\rho = \sqrt{\frac{1.293}{1.977}} = 0.809$$

จากสูตรการหาสัมประสิทธิ์ของความดัน

$$C_P = \sqrt{\frac{P + 0.1013}{P_d + 0.1013}}$$

แทนค่า $$C_P = \sqrt{\frac{0.4 + 0.1013}{0.2 + 0.1013}} = 1.290$$

จากสูตรการหาสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

$$C_t = \sqrt{\frac{t_d + 273}{t + 273}}$$

แทนค่า $$C_t = \sqrt{\frac{20 + 273}{40 + 273}} = 0.968$$

$\therefore \quad C_V = 0.809 \times 1.290 \times 0.968 = 1.010$

$\therefore$ อัตราการไหลจริง = 5 m^3/h × 1.010 = 5.05 m^3/h

กรณีวัดอัตราการไหลของไอ

จากสูตร

อัตราการไหลจริง = ค่าที่อ่านได้ × สัมประสิทธิ์ในการแปลงค่า

เมื่อ

$$C_V = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_d}}$$

กำหนดให้

C_V = สัมประสิทธิ์ในการแปลงค่าความหนาแน่น

ρ = ความหนาแน่นของของไหลที่ทำการวัด $\left(kg/m^3\right)$

ρ_d = ความหนาแน่นของของไหลที่ใช้ในการออกแบบ $\left(kg/m^3\right)$

ตัวอย่าง

ข้อมูลในการออกแบบเครื่องมือวัด

ของไหล : ไอน้ำ, ความหนาแน่น : 5.163 kg/m^3 , ความดัน : 0.902 *MPa.*, อุณหภูมิ : 180^{oC}

ข้อมูลในการใช้งานจริง

ของไหล : ไอน้ำ, ความหนาแน่น : 2.549 kg/m^3 , ความดัน : 0.3479 *MPa.*, อุณหภูมิ : 150^{oC}

ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด : 10 t/h

จากสูตรการหาสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่น

$$C_V = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_d}}$$

แทนค่า $$C_V = \sqrt{\frac{2.549}{5.163}} = 0.703$$

$\therefore$ อัตราการไหลจริงที่อุณหภูมิ 150^{oC} = 10 t/h × 0.703 = 7.03 t/h

จุดเด่นและข้อจำกัดของ Rotameter

จุดเด่น

1. อ่านค่าง่าย มองเห็นได้โดยตรง
2. มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่เพียงชิ้นเดียว จึงมีความทนทาน
3. ไม่ต้องใช้พลังงานใด ๆจากภายนอก
4. ราคาถูก
5. สามารถวัดได้ทั้ง ของเหลว , ไอ และแก๊ส

ข้อจำกัด

1. สเกลในการอ่านค่าไม่ละเอียดมาก
2. มีข้อจำกัดด้านความเที่ยงตรง

บทสรุป

Rotameter เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่นิยมใช้มากในวงการอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นหลายประการ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับสารทำงานที่เป็นของไหลได้หลายชนิด ทำให้ได้รับความนิยมอย่างมากในหลาย ๆ วงการ ไม่ว่าจะเป็นด้านงานอุตสาหกรรม จนไปถึงการใช้งานด้านการแพทย์ ประกอบกับที่ในปัจจุบันเครื่องจักรกลหรือระบบที่จำเป็นจะต้องใช้ของไหลชนิดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นของเหลวหรือแก๊สชนิดต่าง ๆ เป็นสารทำงาน จำเป็นต้องมีการตรวจสอบสถานะของของไหลนั้นในทุก ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ ความดัน ความหนืด รวมทั้ง "อัตราการไหล" เพื่อทำให้ทราบว่าของไหลที่เกิดการทำงาน ณ ขณะนั้นมีสภาพหรือคุณสมบัติเหมาะสมกับการทำงานหรือไม่อย่างไร เพื่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยทั้งแก่เครื่องจักรรวมถึงตัวผู้ปฏิบัติงานเอง ส่วนในเรื่องของการสอบเทียบความเที่ยงตรงซึ่งเครื่องมือวัดทุกชนิด รวมทั้ง Rotameter แม้จะมีการออกแบบและสร้างมาเป็นอย่างดี แต่เมื่อผ่านการใช้งานไป ย่อมเกิดการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ ทำให้ค่าความแม่นยำ และความเที่ยงตรงอาจคลาดเคลื่อนไป จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด ในกรณีของ Rotameter เนื่องจากมีการออกแบบให้สามารถวัดอัตราการไหลได้ทั้งของเหลวและแก๊ส ทำให้วิธีการสอบเทียบอัตราการไหลของของไหลทั้งสองชนิดแตกต่างกันซึ่งไม่ได้กล่าวถึงไว้ในบทความนี้ หากมีโอกาสจะได้นำเสนอในครั้งต่อไป

บรรณานุกรม

สมศักดิ์ กีรติวุฒิเศรษฐ์. (2540). *หลักการ และการใช้งาน เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม.* พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ: ส.เอเซียเพรส .

Spitzer, D.W. (1996). *Flow Measurement.* NC.: Research Triangle Park.

Streeter, Victor L. and Wylie, E. Benjamin. (1979). *Fluid Mechanics.* 7th ed. Tokyo: Tosho Printing.