

การพัฒนาระบบการวัดอัตราการไหลและการปรับเทียบโรตاميเตอร์

Development of Flowrate Measurement System and Variable Area Flow Meter Calibration

ชัชวาล พรพัฒน์กุล* และ ยงยุทธ พัฒนพงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถนนพระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 E-mail: chatchaval_p@hotmail.com

Chatchaval Pornpatkul* and Yongyut Pattanapong

Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering,

Pathumwan Institute of Technology

833 Rama I Road, Pathumwan, Bangkok 10330, THAILAND. E-mail: chatchaval_p@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้กล่าวถึงการพัฒนาการวัดอัตราการไหลของของเหลว โดยการนำเครื่องวัดอัตราการไหลแบบโรตاميเตอร์ซึ่งเป็นการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรมาทำการทดลองกับระบบการปรับเทียบอัตราการไหลซึ่งมีเครื่อง Piston Prover เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการอ้างอิงอัตราการไหลที่วัดได้ โดยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบโรตاميเตอร์ที่นำมาทดสอบ มีพิสัย 0.5 - 5 แกลลอนต่อนาที และมีค่าความแม่นยำ $\pm 2\%$ of FS. (± 0.1 แกลลอนต่อนาที) จากผลการทดลองตลอดย่านการวัด ปรากฏว่าที่ตำแหน่ง 2.0 แกลลอนต่อนาที มีค่าความผิดพลาดสูงสุด คือ $+0.011$ แกลลอนต่อนาที ทำการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ตำแหน่งนี้ เมื่อคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายแล้วมีค่า ± 0.02 แกลลอนต่อนาที และเมื่อนำไปรวมกับค่าความผิดพลาดจากการวัดอีก $+0.011$ แกลลอนต่อนาที จะเห็นว่า ค่าความผิดพลาดรวมค่าความไม่แน่นอนขยายยังอยู่ในขอบเขตความแม่นยำของโรตاميเตอร์ จึงสรุปได้ว่า โรตاميเตอร์เครื่องนี้มีสถานะผ่านและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบการวัดอัตราการไหล การปรับเทียบโรตاميเตอร์ ความไม่แน่นอนของการวัด

Abstract

This paper discusses the development of flow measurement of liquid. The Rota flow meter was used to measure the volumetric flowrate and was tested with a calibrated flowrates, which are a standard tool Piston Prover in reference flowrate to be measured. The rate of flow meter was measured by Rota flow meter in a range of 0.5 - 5 gpm, with the accuracy $\pm 2\%$ of FS. (± 0.1 gpm). The results of all

the measurement ranges appear that the maximum error is +0.011 gpm at 2.0 gallons per minute. The expanded uncertainty in measuring was calculated at this position that the calculated value is ± 0.02 gpm. When this value was combined with the error measurement + 0.011 gpm, it was found that the errors included the uncertainty were still in the accuracy of Rota flow meter. In conclusion, this Rotary meter has the appropriate status and can be efficiently applied.

Keywords: flowrate measurement system, rota flow meter calibration, uncertainty of measurement

1. บทนำ

การวัดอัตราการไหลของของไหลมีความสำคัญ ทั้งในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เป็นการวัดปริมาณค่าตัวแปรที่จำเป็นค่าหนึ่งในกระบวนการทางอุตสาหกรรมแทบทุกชนิด เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมการบิน การพยากรณ์อากาศในเรื่องของการวัดความเร็วลม ทางด้านสาธารณสุข เป็นการวัดปริมาณสารละลายหรือยาให้แก่ผู้ป่วยได้อย่างถูกต้อง และที่ใช้อยู่ในชีวิตประจำวันคือการวัดอัตราการไหลของน้ำประปา น้ำมัน แก๊สรถยนต์ การวัดอัตราการไหลเกี่ยวข้องกับการไหลของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เครื่องวัดอัตราการไหลจะต้องมีความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) กว่า การวัดปริมาณค่าตัวแปรอื่น ๆ เช่น ในการซื้อขายแก๊สที่ ปตท. นำมาใช้ สำหรับลูกค้าในกลุ่มโรงไฟฟ้า หรือ EGAT คือ มาตรฐาน American Gas Association Report No.3 (A.G.A.3) Part 3 ปี ค.ศ. 1992 สำหรับค่า Zb, Zf ค่าการยุบตัวของแก๊ส (Compressibility Factor) คำนวณตามมาตรฐาน A.G.A.8 : 1992/94 ซึ่งปริมาณแก๊สนี้จะซื้อ-ขายกันที่ Standard Condition คือ สภาวะที่ อุณหภูมิ = 60°F และความดัน = 14.73 PSI ถ้าหากการวัดอัตราการไหลมีความผิดพลาดในการวัดเพียงเล็กน้อย อาจทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากได้ ทั้งในเรื่องของคุณภาพและประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต นั้นหมายถึงการนำไปสู่การสูญเสียค่าใช้จ่ายที่มากขึ้นนั่นเอง

1.1 การแบ่งประเภทของของไหล

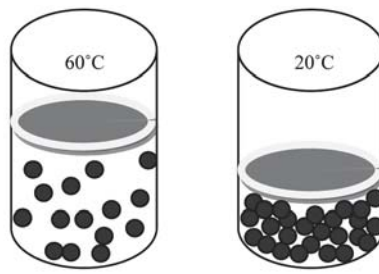
การแบ่งประเภทของของไหล สามารถแบ่งได้เป็นสามประเภทคือ

- 1) แก๊ส เช่น ไนโตรเจน (N_2), ออกซิเจน (O_2), อากาศ (Air)
- 2) ของเหลว เช่น น้ำ, น้ำมัน, เครื่องดื่ม เป็นต้น
- 3) ของแข็ง

1.2 คุณสมบัติของของไหล

คุณสมบัติของของไหลสามารถแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะด้วยกันคือ

- 1) ความหนาแน่นของของไหล (Density) หมายถึงมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (ρ) มีหน่วยคือ kg/m^3 ความหนาแน่นของน้ำ ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm, อุณหภูมิ 4°C จะมีค่า $1000 kg/m^3$ โดยถ้าอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น ความหนาแน่นจะลดลง (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ความหนาแน่นและปริมาตรเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

2) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) หมายถึง อัตราส่วนของน้ำหนักของวัตถุต่อน้ำหนักของน้ำ ที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุนั้น ดังสมการ

$$S = \frac{W}{W_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1)$$

กำหนดให้ S คือความถ่วงจำเพาะ

W คือน้ำหนักของวัตถุ (kg)

W_w คือน้ำหนักของน้ำ (kg)

γ คือน้ำหนักจำเพาะของวัตถุ (N/m^3)

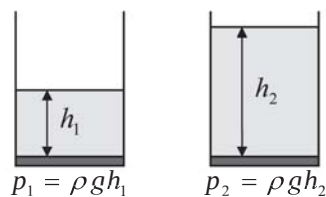
γ_w คือน้ำหนักจำเพาะของน้ำ (N/m^3)

ρ คือความหนาแน่นของวัตถุ (kg/m^3)

ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

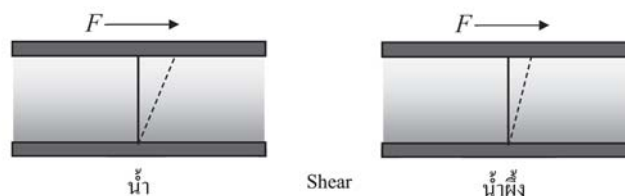
3) ความดัน (Pressure) หมายถึง อัตราส่วนแรงต่อพื้นที่ตั้งฉากกับแนวแรง ดังสมการที่ (2) โดยถ้าความสูงเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความดันสูงขึ้น (รูปที่ 2)

$$p = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{\rho Vg}{A} = \frac{\rho Ahg}{A} = \rho gh \quad (2)$$



รูปที่ 2 ความดันเปลี่ยนแปลงตามความสูงของของเหลว

4) ความหนืด (Viscosity) หมายถึง คุณสมบัติเฉพาะของของไหลแต่ละชนิดที่ต้านทานต่อแรงเฉือน (แรงที่กระทำในทิศทางที่สัมผัสกับผิวของของไหล ดังรูปที่ 3) ความหนืดของของเหลวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่สำหรับแก๊สความหนืดจะมากขึ้นเนื่องจากมีความดันของแก๊สเข้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 3 ความแตกต่างของแรงเฉือนของของไหล

1.3 ลักษณะของการไหล

ลักษณะของการไหลของของไหล สามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณีด้วยกันคือ

- 1) กรณีที่หนึ่ง ให้พื้นที่คงที่ ความเร็วคงที่ ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น การไหลเชิงมวลก็จะเพิ่มขึ้นด้วย
- 2) กรณีที่สอง ให้ความหนาแน่นคงที่ ความเร็วคงที่ พื้นที่เพิ่มขึ้น การไหลเชิงมวลก็จะเพิ่มขึ้นด้วย
- 3) กรณีที่สาม ให้ความหนาแน่นคงที่ พื้นที่คงที่ ความเร็วเพิ่มขึ้น การไหลเชิงมวลก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

2. การวัดอัตราการไหลของของไหล

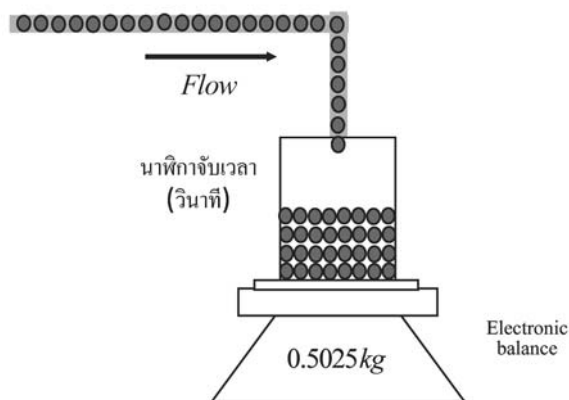
การวัดอัตราการไหลสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ

2.1 การวัดอัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow measurement)

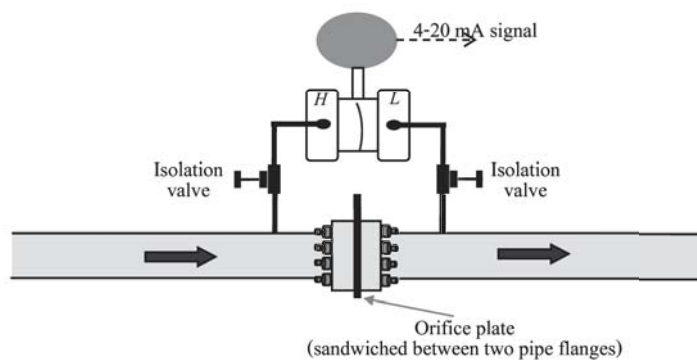
การวัดอัตราการไหลเชิงมวลเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของมวลของของไหลต่อหนึ่งหน่วยเวลา (รูปที่ 4) เช่น เครื่องวัดความดันแตกต่าง (Differential pressure) ดังรูปที่ 5, ออริฟีส (Orifice flow meter), นอสเชิล (Nozzle flow meter), เวนทูรี (Venturi flow meter), พิตอท (Pitot tube flow meter), Thermal mass flow meter และ Coriolis flow meter

สมการวัดอัตราการไหลเชิงมวล

$$\text{mass flow rate} = \frac{[M]}{[t]} \text{ kg / s} \quad (3)$$



รูปที่ 4 การวัดอัตราการไหลเชิงมวล



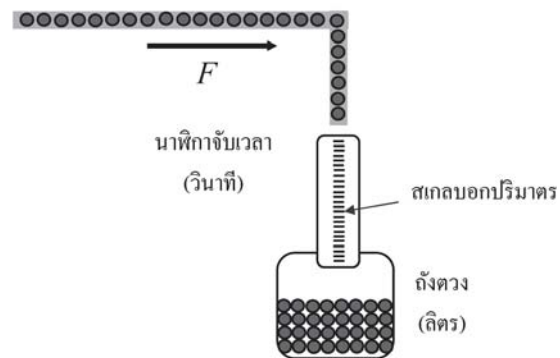
รูปที่ 5 การวัดอัตราการไหลเชิงมวลด้วย D/P Cell

2.2 การวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow measurement)

การวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของของไหลต่อหนึ่งหน่วยเวลา (รูปที่ 6) เช่น Bell prover, Piston prover, Variable area flow meter (Rota meter) ดังรูปที่ 7, Turbine flow meter, Positive displacement flow meter (PD), Electromagnetic flow meter และ Ultrasonic flow meter [1]

สมการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร

$$volumetric\ flow\ rate = \frac{[L^3]}{[t]} \quad m^3 / s \quad (4)$$



รูปที่ 6 การวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร



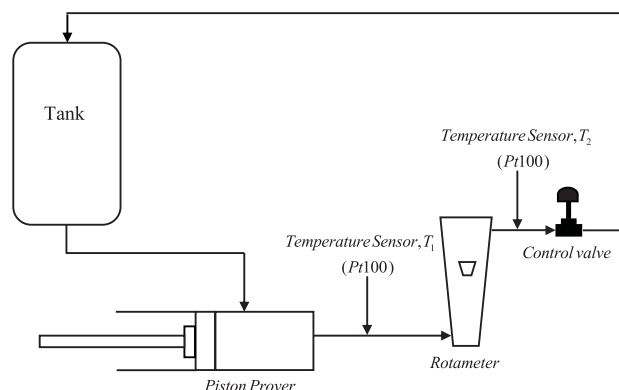
รูปที่ 7 การวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร (โรตاميเตอร์)

3. ขั้นตอนและวิธีการปรับเทียบเครื่องวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร (โรตاميเตอร์) [2]

เครื่องมือที่ใช้ในการปรับเทียบ

- 1) Standard Piston Prover ความไม่แน่นอน 0.007227 ลิตรต่อนาที (68%)
- 2) พิสัยการวัดอัตราการไหล 0.2-150 ลิตรต่อนาที
- 3) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อขนาด 1/2 นิ้ว
- 4) เครื่องวัดอุณหภูมิ pt100
- 5) โรตاميเตอร์ พิสัยการวัด 0.5-5 แกลลอนต่อนาที ความแม่นยำ 5% of F.S.

6) ใช้มาตรฐานในการเปรียบเทียบ ISO 5168 ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 วิธีการปรับเทียบโรตاميเตอร์

7) สมการการวัดและการปรับเทียบอัตราการไหลของของไหล [3]

$$\Delta Q = (Q_{UUC} - Q_{STD}) + (\delta_{STD} + \delta_{error} + \delta_{repeat} + \delta_{resolution} + \delta_{parallax} + \delta_{temp}) \quad (5)$$

เมื่อ	ΔQ	คือ อัตราการไหลที่ผิดพลาด ณ จุดที่ทำการปรับเทียบ
	Q_{UUC}	คือ อัตราการไหลที่ไหลผ่าน โรตاميเตอร์
	Q_{STD}	คือ อัตราการไหลที่ไหลผ่าน Piston prover
	δ_{STD}	คือความไม่แน่นอนมาตรฐานของ Piston prover
	δ_{error}	คือความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าความผิดพลาด
	δ_{repeat}	คือความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวัดซ้ำ
	$\delta_{resolution}$	คือความไม่แน่นอนมาตรฐานของความละเอียดในการอ่านค่าของโรตاميเตอร์
	$\delta_{parallax}$	คือความไม่แน่นอนมาตรฐานของความผิดพลาดจากการอ่านค่า
	δ_{temp}	คือความไม่แน่นอนมาตรฐานของอุณหภูมิที่แตกต่าง (Δt)

8) ผลการปรับเทียบโรตاميเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบโรตاميเตอร์

Reading Scale (UUC) (gallon/min)	Flowrate (STD) $n = 5$ (gallon/min)	Error (gallon/min)
0.50	0.492	+ 0.008
1.00	0.993	+ 0.007
1.50	1.491	+ 0.009
2.00	1.989	+ 0.011
2.50	2.490	+ 0.010
3.00	3.010	- 0.010
3.50	3.509	- 0.009
4.00	4.010	- 0.010
4.50	4.510	- 0.010
5.00	5.010	- 0.010

4. การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด

พิจารณาจากตำแหน่งที่ค่าความผิดพลาดในการวัดสูงสุด 2.0 แกลลอน/นาที ประกอบด้วยแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนอย่างน้อย 6 ค่า (Uncertainty budget)

- ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเครื่องมือมาตรฐาน, $u_{Q(STD)}$
- ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของค่าความผิดพลาด, $u_{error(UUC)}$
- ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของการทำซ้ำ, $u_{repeat(UUC)}$
- ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของค่าความละเอียด, $u_{resolution(UUC)}$
- ค่าความไม่แน่นอนในการวัดจากการอ่านค่า, $u_{parallax(UUC)}$
- ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง, $u_{temp(UUC)}$

4.1 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเครื่องมือมาตรฐาน, $u_{Q(STD)}$

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเครื่องมือมาตรฐานดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{STD} = \frac{V}{t} = \frac{N_e}{K_p \times t} \quad (6)$$

เมื่อ Q_{STD} คือ อัตราการไหลของเครื่องมือมาตรฐาน (Flowrate of STD)

- V คือ ปริมาตรของเครื่องมือมาตรฐาน (Volume of STD)
 t คือ เวลาของเครื่องมือมาตรฐาน (Time of STD)
 N_e คือ Encoder pulses of STD
 K_p คือ จำนวน pulse/liter ที่ได้จากการทดลอง 2741 pulse/liter

คำนวณหาค่า Sensitivity coefficient ของ N_e : c_{N_e}

$$\frac{\partial(Q_{STD})}{\partial(N_e)} = \frac{1}{K_p \times t} \quad (7)$$

คำนวณหาค่า Sensitivity coefficient ของ K_p : c_{K_p}

$$\frac{\partial(Q_{STD})}{\partial(K_p)} = -\frac{N_e}{K_p^2 \times t} \quad (8)$$

คำนวณหาค่า Sensitivity coefficient ของ t : c_t

$$\frac{\partial(Q_{STD})}{\partial(t)} = -\frac{N_e}{K_p \times t^2} \quad (9)$$

$$u_{Q(STD)} = \sqrt{(c_{N_e})^2 u(N_e)^2 + (c_{K_p})^2 u(K_p)^2 + (c_t)^2 u(t)^2 + u_{repeat}(Q_{STD})^2} \quad (10)$$

$$u_{Q(STD)} = \sqrt{\left(\frac{1}{K_p \times t}\right)^2 u(N_e)^2 + \left(-\frac{N_e}{K_p^2 \times t}\right)^2 u(K_p)^2 + \left(-\frac{N_e}{K_p \times t^2}\right)^2 u(t)^2 + u_{repeat}(Q_{STD})^2} \quad (11)$$

Calibration Test Record

Linear Encoder DL-13-0016

Nominal Value 200 mm (10000 pulses)

Correction 0.018 mm

U 0.009+27×10⁻⁶×L mm

Piston Prover Constant MW-x-2011

uc(Kp) 0.95935 pulses/liter

Kp 2741 pulses/liter

Linear Encoder DL-11-0001

Nominal Value 300 mm (15000 pulses)

Correction 0.05 mm

U 0.009+27×10⁻⁶×L mm

accuracy of time 0.00175 second

2.87×10⁻⁵ min

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบ Linear Encoder

Reading		Flowrate	Ne					Veff				Q _{STD}
Counter	Time		Correction	Ne	SD/sqrt(n)	u(Ne)	uc(Ne)		Max	SD/sqrt(n)	uc(Veff)	U _(QSTD)
(pulse)	(min)	(liter/min)	(pulse)	(pulse)	(pulse)	(pulse)	(pulse)	(liter)	(liter)	(liter)	(liter)	(liter/min)
10000	0.4767	7.65	0.9	10000.9				3.648				
10000	0.4781	7.63	0.9	10000.9				3.648				
10000	0.4779	7.63	0.9	10000.9	0.00	6.98	6.98	3.648	3.648	0.0000	0.0028	0.063921
10000	0.4778	7.64	0.9	10000.9				3.648				
10000	0.4781	7.63	0.9	10000.9				3.648				

หมายเหตุ 1) แทนค่าจากการเปรียบเทียบ Linear Encoder ลงในสมการที่ 12 จะได้ $u_{Q(STD)} = 0.007226965 \text{ liter / min}$

2) โรตารีมีหน่วยเป็น แกลอนต่อนาที แต่เครื่องมีมาตรฐานมีหน่วยเป็นลิตรต่อนาที จึงต้องทำการแปลงหน่วยจากแกลอนต่อนาทีเป็นลิตรต่อนาที (1 แกลอนต่อนาที = 3.785 ลิตรต่อนาที)

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบโรตารี ที่ 2 แกลอนต่อนาที

Point	UUC Reading		Flowrate	Counter	Time	Temperature (°C)			Humidity
	(gallon/min)	(liter/min)	(liter/min)	(pulse)	(second)	T ₁	T ₂	Ambient	%
4	2.0	7.57	7.53	10000	28.604	19.75	19.6	20.10	63.6
	2.0	7.57	7.53	10000	28.684	19.75	19.6	20.15	63.6
	2.0	7.57	7.53	10000	28.675	19.78	19.7	20.20	63.0
	2.0	7.57	7.54	10000	28.666	19.78	19.7	20.23	63.8
	2.0	7.57	7.53	10000	28.688	19.79	19.7	20.20	63.5
AVG	2.00	7.57	7.532	10000	28.6634	19.77	19.66	20.176	63.5
σ	0.00	0.00	0.0045	0.00	0.034	0.019	0.055	0.05	0.3

ตารางที่ 4 ค่าความผิดพลาดจากการเปรียบเทียบโรตารี

Point	UUC Reading		Flowrate (STD)	Error
	(gallon/min)	(liter/min)	(liter/min)	(liter/min)
4	2.0	7.57	7.53	+0.04
	2.0	7.57	7.53	+0.04
	2.0	7.57	7.53	+0.04
	2.0	7.57	7.54	+0.03
	2.0	7.57	7.53	+0.04
AVG	2.00	7.57	7.532	+0.038
σ	0.00	0.00	0.0045	0.0045

4.2 คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของค่าความผิดพลาด, $u_{error(UUC)}$

การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของค่าความผิดพลาด และมีการกระจายความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal distribution), องศาความเป็นอิสระ $n-1$ (Degrees of freedom, ν), Sensitivity coefficient, $c_i=1$

$$u_{error(UUC)} = c_i \frac{\sigma_{error}}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

$$u_{error(UUC)} = \frac{0.0045}{\sqrt{5}} = 0.002 \text{ lite / min}$$

4.3 คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของการทำซ้ำ, $u_{repeat(UUC)}$

การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของการทำซ้ำและมีการกระจายความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal distribution), องศาความเป็นอิสระ $n-1$ (Degrees of freedom, ν), Sensitivity coefficient, $c_i=1$, (กรณีนี้ใช้แนวทางของ GUM, Type A มาคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน ที่เกิดจากการทดลอง)

$$u_{repeat(UUC)} = c_i \frac{\sigma_{repeat}}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

$$u_{repeat(UUC)} = \frac{0.0045}{\sqrt{5}} = 0.002 \text{ lite / min}$$

4.4 คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของค่าความละเอียด, $u_{resolution(UUC)}$

การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของค่าความละเอียดและมีการกระจายความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution), องศาความเป็นอิสระ (Degrees of freedom, ν) เข้าใกล้อนันต์ (∞), Sensitivity coefficient, $c_i=1$

เนื่องจากสเกลของโรตاميเตอร์อ่านค่าได้ละเอียด 0.05 แกลลอนต่อนาที แต่หน่วยที่ใช้ในการคำนวณจะเป็น ลิตรต่อนาที จึงจำเป็นต้องแปลงหน่วยความละเอียดของโรตاميเตอร์ ก่อน $0.05 \times 3.785 = 0.18925$ ลิตรต่อนาที

$$u_{resolution(UUC)} = \frac{resolution}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

$$u_{resolution(UUC)} = \frac{0.18925}{\sqrt{3}} = 0.10926 \text{ lite / min}$$

4.5 กำหนดค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดจากการอ่านค่า, $u_{\text{parallax}(UUC)}$

การกำหนดค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดจากการอ่านค่าและมีการกระจายความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution), องศาความเป็นอิสระ (Degrees of freedom, ν) เข้าใกล้อนันต์ (∞), Sensitivity coefficient, $c_i = 1$

ค่าความผิดพลาดจากการอ่านจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของสเกลโรตารีมิเตอร์ จึงให้นำเอาค่าความละเอียดของโรตารีมิเตอร์ มาใช้ในการกำหนดค่าความไม่แน่นอนในการวัดจากการอ่านค่า

$$u_{\text{parallax}(UUC)} = \frac{\text{resolution}}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

$$u_{\text{parallax}(UUC)} = \frac{0.18925}{\sqrt{3}} = 0.10926 \text{ lite / min}$$

4.6 กำหนดค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง, $u_{\text{temp}(UUC)}$

การกำหนดค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงและมีการกระจายความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution), องศาความเป็นอิสระ (Degrees of freedom, ν) เข้าใกล้อนันต์ (∞), Sensitivity coefficient, $c_i = 1$

$$u_{\text{temp}(UUC)} = 0.000972 \text{ lite / min} \text{ (น้อยมากตัดทิ้งได้)}$$

4.7 ประเมินค่าของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combine uncertainty, u_c)

การประเมินค่าของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม โดยการนำความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ได้จากการประเมินความไม่แน่นอนทั้งหมด มาคำนวณหาค่าของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

$$u_c(\Delta Q) = \sqrt{(u_{Q_STD})^2 + (u_{\text{error_}UUC})^2 + (u_{\text{repeat_}UUC})^2 + (u_{\text{res_}UUC})^2 + \dots + (u_{\text{parallax_}UUC})^2 + (u_{\text{temp_}UUC})^2} \quad (16)$$

$$u_c(\Delta Q) = \sqrt{(0.007227)^2 + (0.002)^2 + (0.002)^2 + (0.10926)^2 + (0.10926)^2}$$

$$u_c(\Delta Q) = 0.0311 \text{ lite / min}$$

นอกจากการพิจารณาค่าปริมาณที่วัด ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมแล้ว ยังจะต้องพิจารณาระดับความเชื่อมั่น เพื่อที่จะขยายผลของความไม่แน่นอน ในระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ (ในปัจจุบันยอมรับกันที่ประมาณ 95%) ระดับความเชื่อมั่นจะมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, k) และค่าองศาอิสระ (Degrees of freedom) ตามแนวทางของ EA-4/02 [4] โดยใช้สมการของ Welch-Satterwaite Equation

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{v_i}} \quad (17)$$

$$v_{eff} = \frac{u_{c,\Delta Q}^4}{\left(\frac{u_{STD}^4}{n-1}\right) + \left(\frac{u_{error}^4}{n-1}\right) + \left(\frac{u_{repeat}^4}{n-1}\right) + \left(\frac{u_{res}^4}{\infty-1}\right) + \left(\frac{u_{parallax}^4}{\infty-1}\right) + \left(\frac{u_{temp}^4}{\infty-1}\right)}$$

$$v_{eff} = \frac{0.0311^4}{\left(\frac{0.007227^4}{5-1}\right) + \left(\frac{0.002^4}{5-1}\right) + \left(\frac{0.002^4}{5-1}\right) + 0 + 0 + 0} \geq 100$$

ตารางที่ 5 Student's "t" Distribution

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	100	∞
$t_{95\%}(v)$	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.28	2.13	2.00	2.00

4.8 คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty and Level of confidence)

การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนขยาย เมื่อได้ค่าองศาอิสระแล้ว นำไปเทียบตาราง Students' t-Distribution ที่ค่าความเชื่อมั่นประมาณ 95% จะได้ค่าตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, k) = 2.00 (ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะใช้ค่าประมาณของ $k = 2$) เพื่อคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนขยาย [5]

$$U(\Delta Q) = k \times u_c(\Delta Q) \quad (18)$$

$$U(\Delta Q) = 2 \times 0.0311 = 0.0622 \text{ lite / min} = 0.02 \text{ gallon / min}$$

5. สรุปผลการเปรียบเทียบโรตاميเตอร์

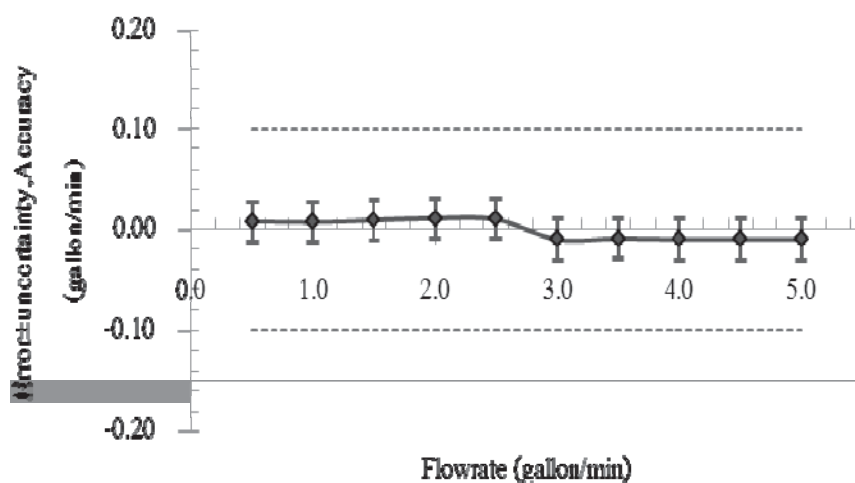
ตารางที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบโรตاميเตอร์รวมค่าความไม่แน่นอนขยาย

ตารางที่ 6 สรุปผลการปรับเทียบโรตاميเตอร์รวมค่าความไม่แน่นอนขยาย

Reading		Flowrate		Error	Expanded
UUC		STD			Uncertainty
(gallon/min)	(liter/min)	(gallon/min)	(liter/min)	(gallon/min)	(gallon/min)
2.0	7.57	1.989	7.532	+0.011	0.02

6. การนำผลการปรับเทียบไปใช้งาน

จากคุณลักษณะเฉพาะของโรตاميเตอร์ที่นำมาปรับเทียบมีพิสัย 0.5-5 แกลลอนต่อนาที และมีค่าความแม่นยำ $\pm 2\%$ of F.S ดังนั้นขอบเขตของความผิดพลาดของโรตاميเตอร์คือ $(2 \times 5)/100 = \pm 0.1$ แกลลอนต่อนาที เมื่อคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายแล้วมีค่า ± 0.02 แกลลอนต่อนาที เมื่อนำไปรวมกับค่าความผิดพลาดจากการวัดอีก $+0.011$ แกลลอนต่อนาที จะเห็นว่า ค่าความผิดพลาดรวมค่าความไม่แน่นอน (รูปที่ 9) ยังอยู่ในขอบเขตความแม่นยำของโรตاميเตอร์ จึงสรุปได้ว่า โรตاميเตอร์เครื่องนี้มีสถานะผ่านสามารถนำไปใช้งานได้



รูปที่ 9 ผลการปรับเทียบโรตاميเตอร์

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ธีรารักษ์ ชินารักษ์และอาจารย์ณิษฐา ลีแดง จากห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องวัดอัตราการไหล สถาบันมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย ที่ได้ถ่ายทอดองค์ความรู้และสาธิตการปรับเทียบโรตاميเตอร์ในการเก็บข้อมูลและได้นำมาเขียนบทความในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัชวาล พรพัฒน์กุล. การวัดอัตราการไหลและการเปรียบเทียบเครื่องวัดอัตราการไหล. เอกสารประกอบคำสอนวิชามาตรวิทยาและการสอบเทียบ. สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน, กรุงเทพมหานคร, 2557.
- [2] มงคล เดชนครินทร์. พจนานุกรม ศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้า ฉบับ ว.ส.ท. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2550.
- [3] ธีรารักษ์ ชินารักษ์, และชนิษฐา ลีแดง. การสอบเทียบเครื่องมือวัดอัตราการไหล (ของเหลว) เบื้องต้น. เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการ โครงการพัฒนาการเรียนการสอนและถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านมาตรวิทยา ระดับอุดมศึกษา. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, ปทุมธานี, 15-29 กรกฎาคม 2557.
- [4] Publication Reference. EA-4/02; *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration*. www.european-accreditation.org, 2013.
- [5] International Standardization Organization. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; GUM*. first Edition, 1995, ISBN 92-67-10188-9.