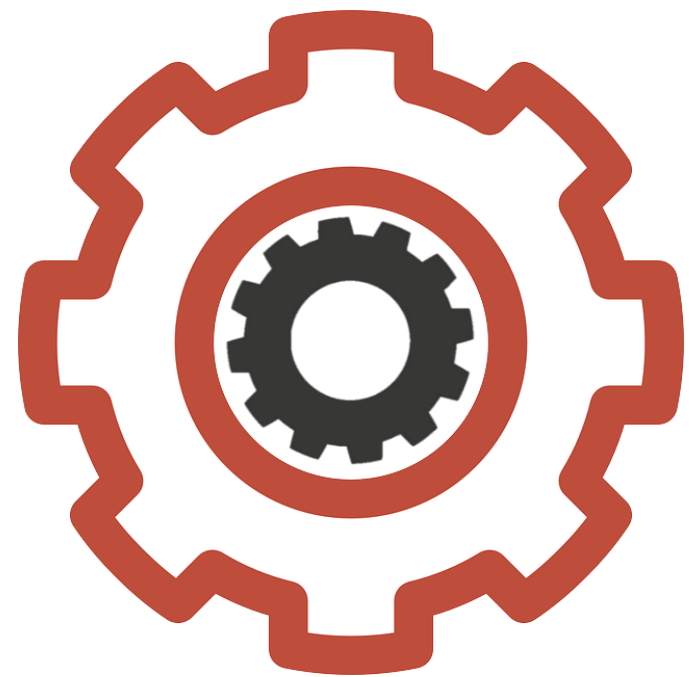




การวัดอัตราการไหล (Flow Measurement)





การวัดอัตราการไหลของของไหลโดยใช้เครื่องมือวัด มีการวัดอัตราการไหลได้หลายวิธี เช่น การวัดอัตราการไหลโดยใช้ของไหลผ่านรู (Orifices) ของไหลผ่านเวนจูรี (Venturi) และของไหลผ่านหลอด (Pitot Tube) ซึ่งวิธีการวัดอัตราการไหลของของไหลของแต่ละแบบเหมาะกับการใช้งานที่ใช้ในลักษณะต่างๆ ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป



1. การวัดอัตราการไหลผ่านรู
2. สัมประสิทธิ์ของกระแสของของไหลเริ่มขนาน
3. สัมประสิทธิ์ของความเร็ว
4. สัมประสิทธิ์ของการจ่ายของไหล
5. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ C_C C_V และ C_d
6. การสูญเสียความดันในรูปความสูงของการวัดอัตราการไหลผ่านรู
7. การวัดอัตราการไหลผ่านเวนจูรี
8. การจ่ายผ่านเวนจูรี
9. การวัดอัตราการไหลผ่านหลอด



1. แสดงความรู้เกี่ยวกับการวัดอัตราการไหลแบบรู
2. แสดงความรู้เกี่ยวกับการวัดอัตราการไหลแบบเวนจูรี
3. แสดงความรู้เกี่ยวกับการวัดอัตราการไหลแบบหลอด

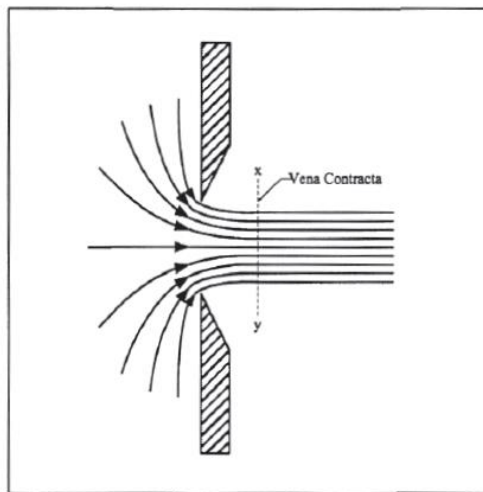


1. อธิบายหลักการวัดอัตราการไหลแบบรู แบบเวนจูรี และแบบหลอดได้ถูกต้อง
2. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง C_c C_v และ C_d ได้ถูกต้อง
3. คำนวณหาอัตราการไหลผ่านเวนจูรีได้ถูกต้อง
4. คำนวณหาอัตราการไหลผ่านหลอดได้ถูกต้อง
5. คำนวณหาพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการไหลของของไหลได้ถูกต้อง

การวัดอัตราการไหลผ่านรู (Flow Through Orifices)

เมื่อของไหลไหลผ่านรู (Orifice) จำนวนของไหลที่ผ่านรู (Discharge) จะขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างและแบบของรูตามสภาพความเป็นจริง เนื่องจากในขณะของไหลไหลผ่านรูจะมีความฝืด ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้น จำนวนของไหลที่ผ่านรูและความเร็วที่ใช้จริง (Actual Discharge and Actual Velocity) จะเปลี่ยนไป และมีค่าต่างกับของไหลที่ผ่านรูและความเร็วทางทฤษฎี (Ideal Discharge and Ideal Velocity)

จากการทดลองปรากฏว่า ขณะที่ของไหลไหลผ่านรูนั้น กระแสของของไหล (Stream Line) จะไม่ขนานกัน แต่จะเกิดคอคอด (Contraction) ขึ้น คอคอดนี้จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และลักษณะของรูนั้น ส่วนของน้ำที่พุ่งตรงกระแสของของไหลเริ่มขนานกัน เรียกว่า Vena Contracta



สัมประสิทธิ์ของกระแสน้ำของไหลเริ่มขนาน (The Coefficient of Contraction)

อัตราส่วนของพื้นที่ของน้ำที่จุด Vena Contraction กับพื้นที่ของรู เรียกว่า Coefficient of Contraction (C_C)

$$C_C = \frac{\text{พื้นที่ของน้ำที่พุ่งตรงเริ่มขนาน (Area of Waterjet)}}{\text{พื้นที่ของน้ำที่ผ่านรู (Area of Orifice)}}$$

$$A_{JET} = C_C \times A_0$$

... 10.1

โดย

A_{JET} = พื้นที่ของน้ำที่พุ่งตรงเริ่มขนาน

C_C = สัมประสิทธิ์ของกระแสน้ำของไหลเริ่มขนาน

A_0 = พื้นที่ของน้ำที่ผ่านรู

ค่า C_C หาได้จากการทดลอง ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และลักษณะของรู (Orifice)

C_C ของรูที่ขอบคม (Sharp Edge Orifice) มีค่าเท่ากับ 0.61-0.72

สัมประสิทธิ์ของความเร็ว

(The Coefficient of Velocity)

สัมประสิทธิ์ของความเร็ว หมายถึง อัตราส่วนระหว่างคงที่ Vena Contracta (Actual Velocity) กับความเร็วที่น้ำพุ่งเป็นลำ (Theoretical Velocity of Jet)

$$C_V = \frac{\text{ความเร็วที่ Vena Contracta (Actual Velocity)}}{\text{ความเร็วที่น้ำพุ่งเป็นลำ (Theoretical Velocity of Jet)}}$$

โดย

$$V_{act} = C_V \times V_{th}$$

... 10.2

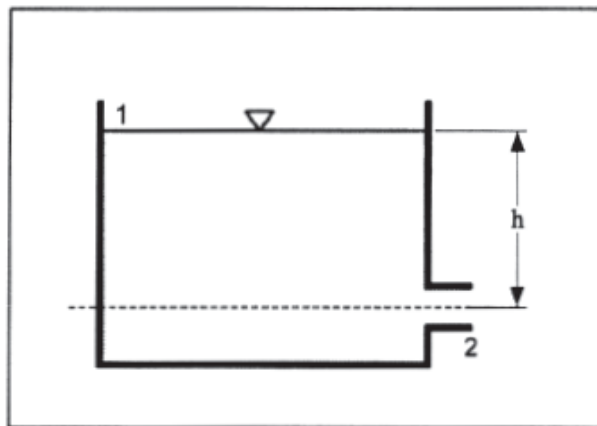
V_{act} = ความเร็วที่ Vena Contracta

C_V = Coefficient of Velocity

V_{th} = ความเร็วที่น้ำพุ่งเป็นลำ

สัมประสิทธิ์ของความเร็ว

(The Coefficient of Velocity)



สมการการไหลสม่ำเสมอ เป็นสมการของ Bernoulli's Equation จะได้ว่า

$$\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \frac{P_2}{\gamma}$$

... 10.3

โดย

$$P_1 = P_2 \quad (\text{เพราะเป็นความดันของบรรยากาศ})$$

$$V_1 = 0 \quad (\text{เพราะเป็นความเร็วที่ระดับน้ำไม่มีความร้อน})$$

$$Z_2 = 0 \quad (\text{เพราะความสูงที่จุด 2 ไม่มี})$$

สัมประสิทธิ์ของความเร็ว

(The Coefficient of Velocity)

ดังนั้น สมการ 10.3 จะได้ว่า

$$Z_1 = \frac{V_2^2}{2g}$$

$$V_2^2 = 2gZ_1$$

$$V_2^2 = 2gh$$

โดย

$$Z_1 = h$$

ดังนั้น

$$V_2 = \sqrt{2gh}$$

สัมประสิทธิ์ของความเร็ว (The Coefficient of Velocity)

จากสมการ 10.2

$$V_{act} = C_V \times V_{th}$$

โดย $V_2 = V_{th}$

แทนค่า $V_2 = V_{th}$ ในสมการ 10.2

ดังนั้น

$$V_{act} = C_V \times \sqrt{2gh}$$

... 10.4

ค่า C_V ขึ้นอยู่กับความเสียดทาน ขนาด รูปร่าง และลักษณะของรู (Orifice)
 C_V ของรูที่ขอบคม (Sharp Edge Orifice) มีค่าเท่ากับ 0.95-0.99

สัมประสิทธิ์ของการจ่ายของไหล (The Coefficient of Discharge)

เนื่องจากมีคอขวดเกิดขึ้นที่กระแสน้ำของไหลเริ่มขนาน (Water Jet) และความเร็วที่ใช้จริง (Actual Velocity) น้อยกว่าความเร็วทางทฤษฎี (Theoretical Velocity) ดังนั้น การจ่ายของของไหลที่ได้จริง (Actual Discharge) จึงมีค่าน้อยกว่าการจ่ายของของไหลทางทฤษฎี (Theoretical Discharge)

$$C_d = \frac{\text{การจ่ายของของไหลที่ได้จริง (Actual Discharge)}}{\text{การจ่ายของของไหลทางทฤษฎี (Theoretical Discharge)}}$$

สัมประสิทธิ์ของการจ่ายของไหล (The Coefficient of Discharge)

$$Q_{act} = C_d \times Q_{th}$$

... 10.5

โดย

Q_{act} = อัตราการจ่ายของของไหลที่ได้จริง

C_d = สัมประสิทธิ์ของการจ่ายของของไหล

Q_{th} = อัตราการจ่ายของของไหลทางทฤษฎี

ค่า C_d ขึ้นอยู่กับความเสียดทาน ขนาด รูปร่าง และลักษณะของรู (Orifice)

C_d ของรูที่ขอบคม (Sharp Edge Orifice) มีค่าเท่ากับ 0.62

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ C_c C_v และ C_d

จากสมการที่ 10.5

$$Q_{act} = C_d \times Q_{th}$$

โดย $Q_{th} = A_0 \times V_{th}$

$$Q_{act} = A_{JET} \times V_{act}$$

ดังนั้น

$$A_{JET} \times V_{act} = C_d \times A_0 \times V_{th} \quad \dots 10.6$$

โดย $A_{JET} = C_c \times A_0$

$$V_{act} = C_v \times V_{th}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ C_c C_v และ C_d

ดังนั้น สมการ 10.6 จึงได้ว่า

$$\begin{aligned} C_c \times A_0 \times C_v \times V_{th} &= C_d \times A_0 \times V_{th} \\ &= \frac{C_c \times A_0 \times C_v \times V_{th}}{A_0 \times V_{th}} \end{aligned}$$

$$C_d = C_c \times C_v$$

... 10.7

การสูญเสียความดันในรูปความสูงของการวัดอัตราการไหลผ่านรู (Head Loss in an Orifices)

การสูญเสียความดันที่ของไหลไหลผ่าน เกิดจากความเสียดทานของผิวท่อ ขนาดของท่อความยาวของท่อและความเร็วในการไหล การสูญเสียกำลังงานจะสูงตามไปด้วย

$$V_{th} = \sqrt{2gh}$$

$$h = \frac{V_{th}^2}{2g}$$

$$V_{act} = C_v \cdot \sqrt{2gh}$$

$$h = \frac{1}{C_v^2} \cdot \frac{V_{act}^2}{2g}$$

การสูญเสียความดันในรูปความสูงของการวัดอัตราการไหลผ่านรู (Head Loss in an Orifices)

เพราะฉะนั้น

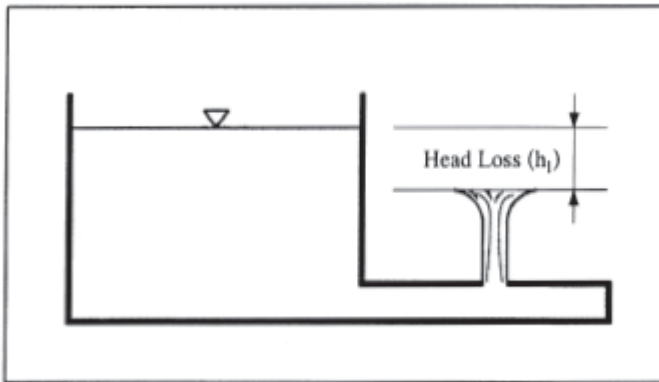
$$\frac{V_{act}^2}{2g} = c_v^2 \cdot h$$

$$\text{Head loss} = h - c_v^2 \cdot h$$

$$h_L = (1 - c_v^2) \cdot h$$

$$h_L = \frac{V_{th}^2}{2g} - \frac{V_{act}^2}{2g}$$

$$= \frac{V_{act}^2}{c_v^2 \cdot 2g} - \frac{V_{act}^2}{2g}$$



$$h_L = \left[\frac{1}{c_v^2} - 1 \right] \frac{V_{act}^2}{2g}$$

... 10.8

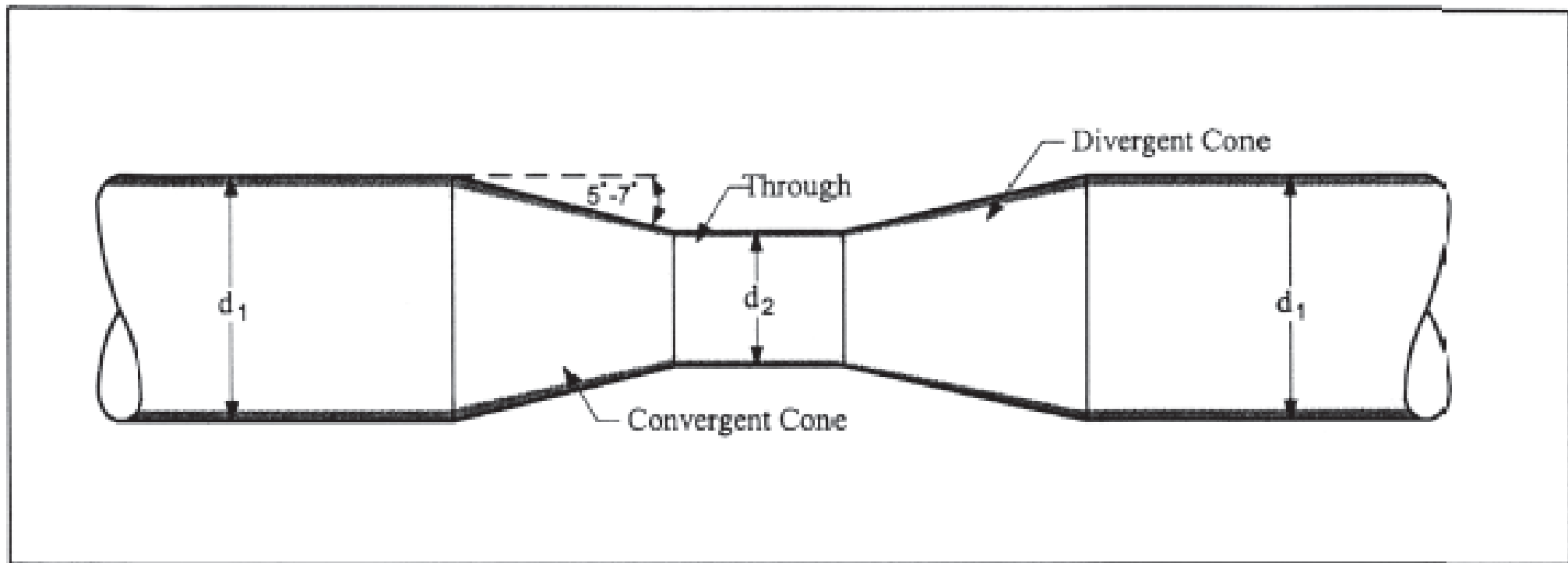
การวัดอัตราการไหลผ่านเวนจูรี(Venturi Meter)

การวัดอัตราการไหลผ่านเวนจูรี เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับหาอัตราการไหลของของไหลในท่อ ซึ่งอาศัยหลักการของสมการการไหลอย่างสม่ำเสมอ (Bernoulli's Equation) เวนจูรีมิเตอร์ ประกอบด้วย ท่อเวนจูรี (Venturi Tube) และแมนอมิเตอร์ (Manometer) เป็นแบบเกจวัดความดันแตกต่าง (Different Pressure Gauge)

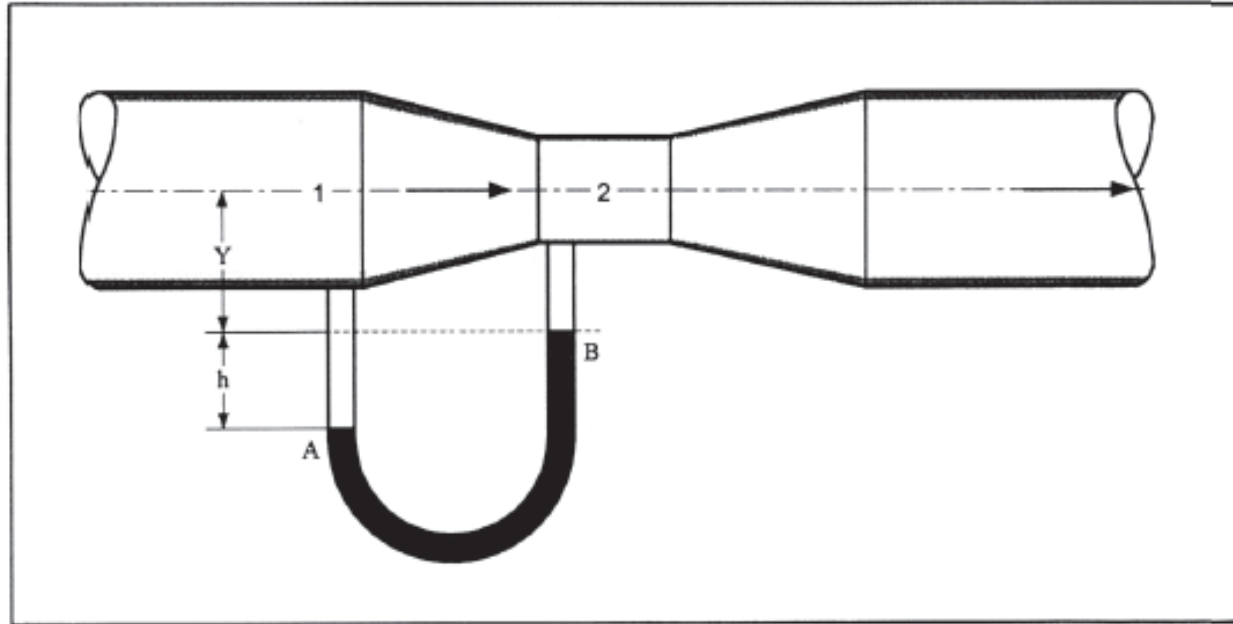
ท่อเวนจูรี (Venturi Tube) ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ 3 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เรียวจาก d_1 กับ d_2 เป็นส่วนของเหลวไหลเข้า (Convergent Cone)
2. ส่วนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง d_2 ซึ่งมีค่าคงที่ (Throat) โดย d_2 มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{4}$ ถึง $\frac{1}{2}$ ของ d_1
3. ส่วนที่เรียกว่า d_2 ไป d_1 เป็นส่วนของเหลวไหลออก (Divergent Cone) ความยาวของ Divergent Cone ยาวกว่า Convergent Cone

การวัดอัตราการไหลผ่านเวนจูรี(Venturi Meter)



การจ่ายผ่านเวนจูรี(Discharge Through a Venturi)



พิจารณาการวัดอัตราการไหลผ่านเวนจูรี (Venturi Meter) ซึ่งมีของเหลวไหลผ่าน
จากสมการเบอร์เนอรรี จะได้ว่า

$$\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \frac{P_2}{\gamma}$$

การจ่ายผ่านเวนจูรี(Discharge Through a Venturi)

ให้ระดับสมมติ อยู่ที่จุดกึ่งกลางของท่อ

โดย $Z_1 = Z_2 = 0$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \frac{P_2}{\gamma}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$

... 10.9

การจ่ายผ่านเวนจูรี(Discharge Through a Venturi)

จากสมการการไหลต่อเนื่อง (Equation of Continuity)

$$Q_1 = A_1 V_1 = A_2 V_2 \dots\dots\dots = \text{ค่าคงที่}$$

$$V_1 = \frac{A_2 V_2}{A_1}$$

$$V_1^2 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \cdot V_2^2$$

การจ่ายผ่านเวนจูรี(Discharge Through a Venturi)

แทนค่า V_1^2 ในสมการ 10.9

ดังนั้น

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} - \left(\frac{A_2}{A_1}\right) \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)$$

$$V_2^2 = \frac{\left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma}\right) \cdot 2g}{\left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}$$

$$V_2 = \frac{\sqrt{\left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma}\right) \cdot 2g}}{\left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}$$

... 10.10

การจ่ายผ่านเวนจูรี(Discharge Through a Venturi)

$\frac{P_1 - P_2}{\gamma}$ คือ ค่าความดันที่อยู่ในรูปความสูง (Different Head Pressure) ระหว่างจุด 1 กับจุด 2 ค่า h จะอยู่ในรูปความสูงของของเหลวที่บรรจุในแมนอมิเตอร์ (Manometer) ดังนั้น ต้องเปลี่ยน h ให้อยู่ในรูปความสูงของของไหล (Fluid) ที่ไหลในท่อ จะได้ว่า

$$P_A = \gamma_f (y+h) + P_1 \quad \dots 10.11$$

$$P_B = \gamma_f \cdot y + P_2 \quad \dots 10.12$$

$$P_A - P_B = \gamma_f \cdot h_f + (P_1 - P_2)$$

$$\gamma_m \cdot h_m = \gamma_f \cdot h_f + \gamma_f \cdot h_f$$

$$h_f = \frac{(\gamma_m \cdot h_m - \gamma_f \cdot h_m)}{\gamma_f}$$

$$h_f = h \left[\frac{\gamma_m}{\gamma_f} \right] - 1 \quad \dots 10.13$$

การจ่ายผ่านเวนจูรี(Discharge Through a Venturi)

จากอัตราการจ่ายของของไหลทางทฤษฎี (Q_{th}) โดยหาได้จากสมการการไหลต่อเนื่อง จะได้ว่า $Q_{th} = A_2 \cdot V_2$

$$Q_{th} = \frac{A_2 \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} \cdot 2g}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad \dots 10.14$$

ดังนั้น

$$Q_{act} = \frac{C_d \cdot A_2 \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} \cdot 2g}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad \dots 10.15$$

โดย

Q_{act} = อัตราการจ่ายของของไหลที่ได้จริง

C_d = สัมประสิทธิ์ของการจ่ายของของไหล

การจ่ายผ่านเวนจูรี(Discharge Through a Venturi)

$$K = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

ค่า K คือ สัมประสิทธิ์ของการไหล (Flow Coefficient) นำค่า K แทนค่า ในสมการ 10.15

$$Q_{act} = K \cdot A_2 \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} \cdot 2g}$$

$$Q_{act} = K \cdot A_2 \sqrt{2gh} \quad \dots 10.16$$

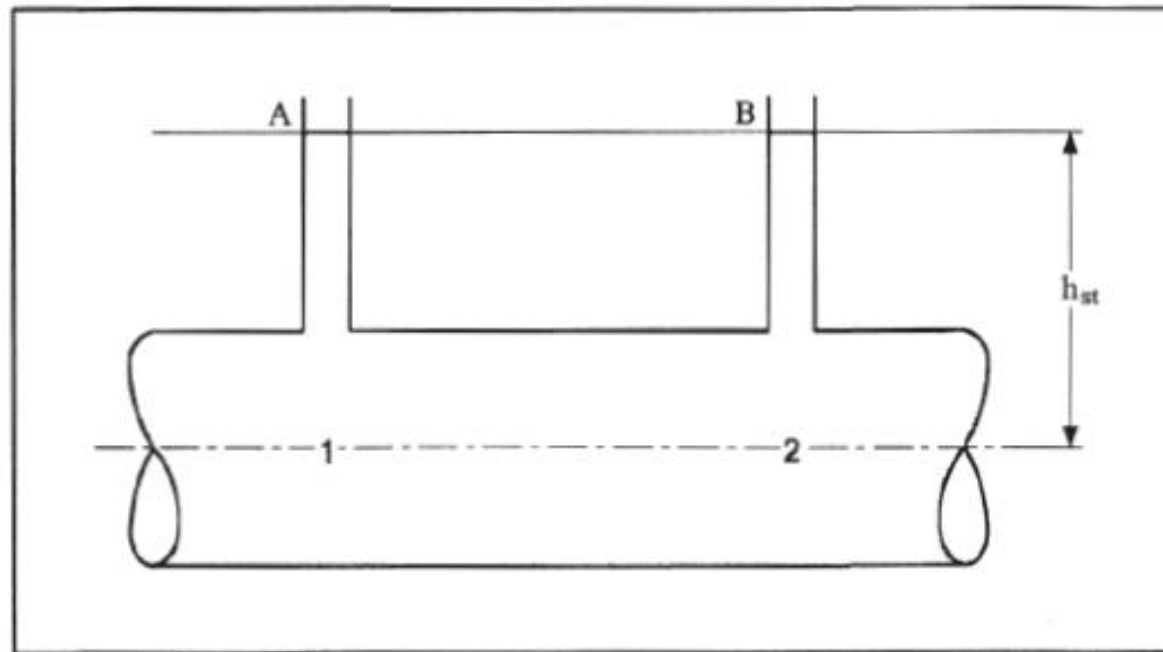
$$\frac{A_2}{A_1} = m$$

ค่า m คือ อัตราส่วนพื้นที่ (Area Ratio) ดังนั้น

$$Q_{act} = \frac{C_d \cdot A_1 \sqrt{2gh}}{\sqrt{m^2 - 1}} \quad \dots 10.17$$

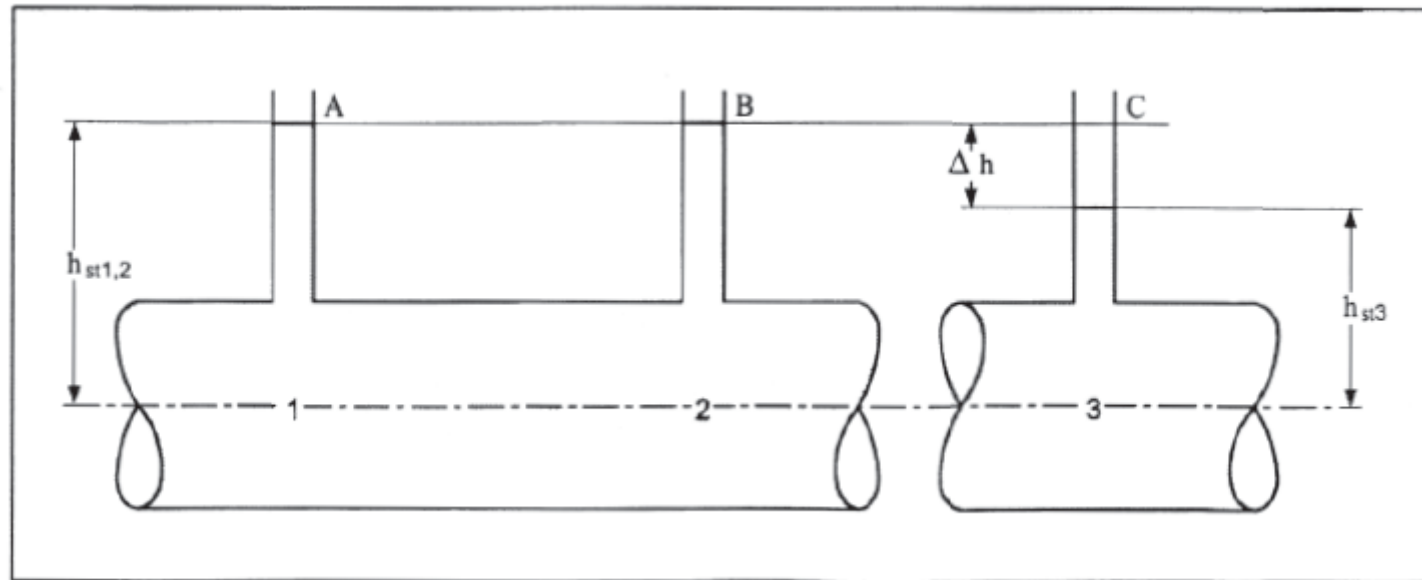
การวัดอัตราการไหลผ่านหลอด (Pitot Tube)

เราสามารถหาค่าความเร็วของของไหลที่ไหล โดยการพิจารณาลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในท่อ (Pipe) เมื่อของไหลในท่อไม่มีการเคลื่อนที่ ความดันที่อยู่ในรูปความสูง (Pressure Head) ในท่อ A และ B ย่อมสูงเท่ากันไม่ว่าหลอด (Tube) ทั้งสองอยู่ห่างกันเท่าไร เราเรียกความดันที่อยู่ในความสูงนี้ว่าความดันที่อยู่ในความสูงคงที่ (Static Pressure Head) (h_{st})



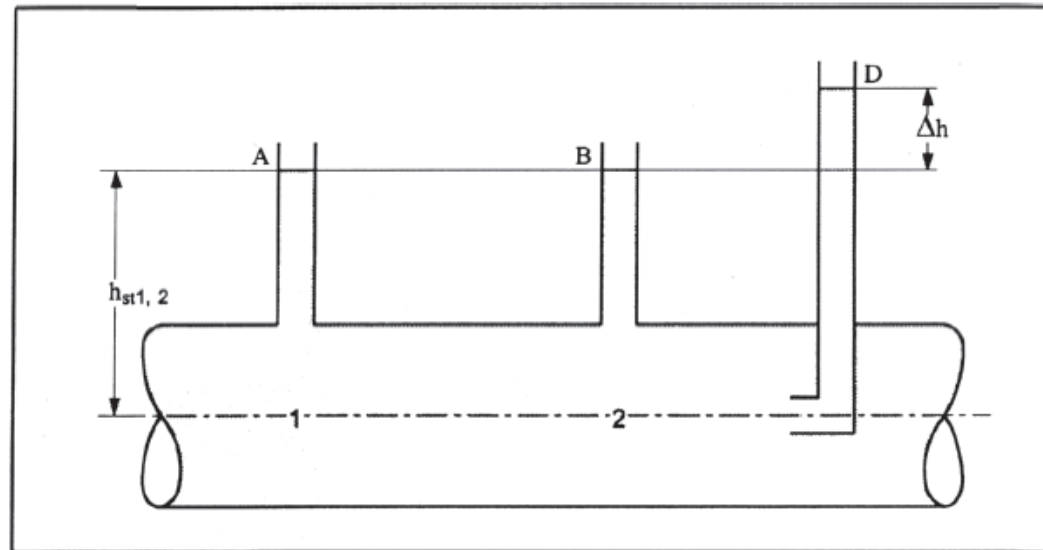
การวัดอัตราการไหลผ่านหลอด (Pitot Tube)

เมื่อของไหลในท่อ (Pipe) มีการเคลื่อนที่โดยหลอด A และ B อยู่ห่างกันเล็กน้อย เราย่อมถือได้ว่า Pressure Head ในหลอด (Tube) ทั้งสองยังคงสูงเท่ากันอยู่ ถ้าหากมีหลอดอีกอันหนึ่ง เช่น หลอด C ซึ่งอยู่ห่างจาก A และ B มาก เราจะพบว่า Pressure Head ในหลอด C ต่ำกว่าหลอด A และ B ทั้งนี้เพราะมีการไหลเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อของไหลได้เปลี่ยนจากพลังงานศักย์ (Potential Energy or Static Head) มาเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic Energy or Velocity Head) ซึ่งมีค่าเท่ากับ Δh



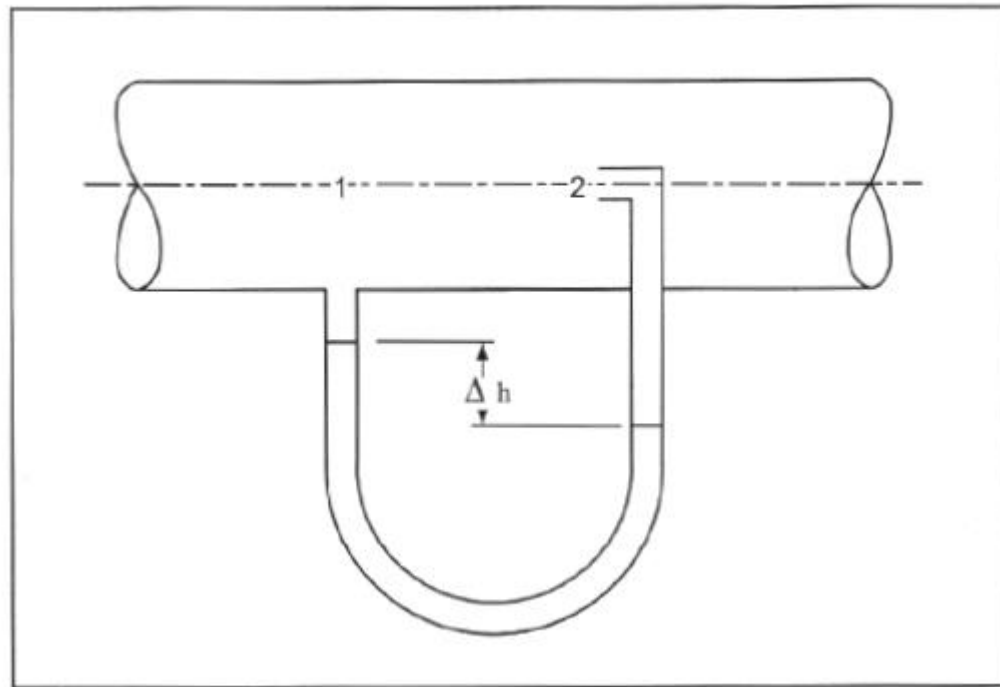
การวัดอัตราการไหลผ่านหลอด (Pitot Tube)

นำ Pitot Tube D มาใส่ไว้ใน Pipe โดยให้ปลายล่างเป็นปากเปิดอยู่ติดกับจุด 2 และอยู่ในแนวศูนย์กลางของท่อ (Center Line of Pipe) ลักษณะเช่นนี้เราจะพบว่า ระดับของของไหลในหลอด D ต่างกับหลอด A และ B อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อธิบายได้ว่า ความสูงที่เพิ่มขึ้น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของมวลที่จุด 1 มาเป็นพลังงานความดัน (Pressure Energy) ที่จุด 2 เพราะเมื่อมวลอยู่ที่จุด 1 ย่อมมีความเร็วไม่เท่ากับศูนย์ แต่เมื่อไหลมาปะทะกับมวลในหลอด (Tube) ที่จุด 2 อยู่ที่ปากหลอด D ความเร็วของมวลนั้นเท่ากับศูนย์จะเห็นได้ว่า ยังมีการปะทะเร็วหรือแรงมาก ค่า Δh ยิ่งสูงมาก



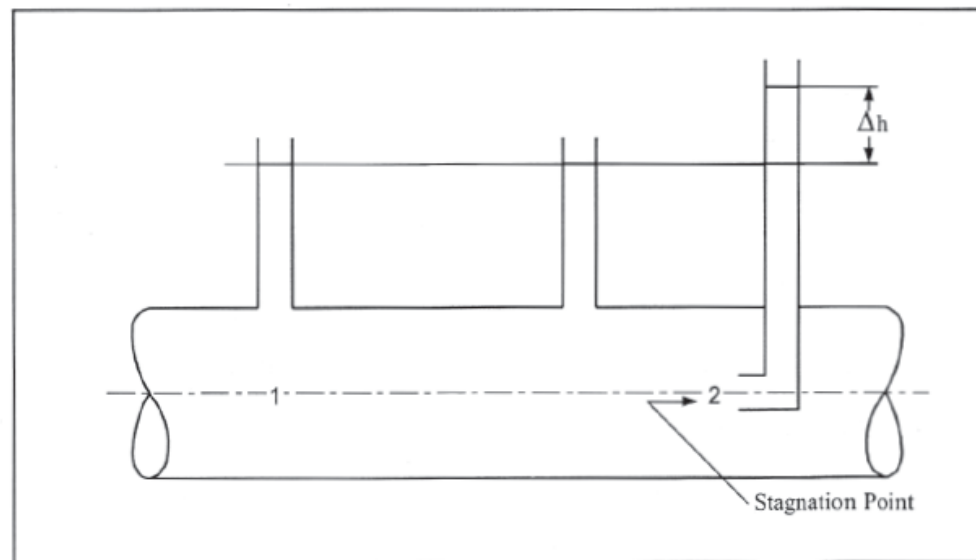
การวัดอัตราการไหลผ่านหลอด (Pitot Tube)

เพื่อให้เกิดความสะดวกในการอ่านค่า h เราควรใช้ U-Tube Manometer เข้ามาช่วย ข้อควรระวัง ลักษณะเช่นนี้เราย่อมจะได้ค่ามีหน่วยเป็นความสูงของของไหลในแมนอมิเตอร์ ดังนั้น เราต้องเปลี่ยนความสูงของของเหลวในแมนอมิเตอร์เป็นความสูงของของไหลที่ไหลในท่อนก่อนจึงจะนำไปคำนวณหาความเร็ว จากสูตร $v = \sqrt{2gh}$ ได้



การวัดอัตราการไหลผ่านหลอด (Pitot Tube)

เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความเร็วของของไหลที่กำลังไหล ของไหลตรงส่วนที่ตรงกับปลายท่อ Pitot Tube จะไหลเข้าไปใน Pitot Tube ทำให้ระดับของของไหลในหลอด (Tube) สูงขึ้นเรื่อย ๆ เลยความดันที่อยู่ในรูปความสูง (Static Pressure Head) จนถึงจุดหนึ่งระดับของของไหลก็คงที่ จะทำให้น้ำหนักของของไหลในหลอด (Tube) เท่ากับแรงดันของของไหลที่ทางเข้าหลอด (Tube) และจะมีจุดหนึ่งอยู่บริเวณทางเข้าของ Pitot Tube ที่มีความเร็วเท่ากับศูนย์จุดนี้เรียกว่า Stagnation Point เพราะฉะนั้นของไหลภายใน Pitot จะเป็นของไหลที่อยู่นิ่ง (Static Fluid)



การวัดอัตราการไหลผ่านหลอด (Pitot Tube)

พิจารณาจุด 1 และจุด 2 จากสมการเบอร์เนอร์รี่ $\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \frac{P_2}{\gamma}$

โดย

$$Z_1 = Z_2 = 0 \text{ (เป็นระดับเดียวกัน)}$$

$$V_2 = 0 \text{ (เป็นความเร็วที่จุดจุดหนึ่งอยู่บริเวณทางเข้าของ Pitot Tube มีค่าเท่ากับศูนย์)}$$

$$V_1^2 = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} \cdot 2g$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} \cdot 2g}$$

$$V_1 = \sqrt{2gh}$$

การวัดอัตราการไหลผ่านหลอด (Pitot Tube)

ดังนั้น

$$V_{act} = C_P \times V_{th}$$

... 10.18

โดย

$$V_{act} = \text{ความเร็วที่ใช้งานจริง}$$

$$V_{th} = V_1$$

$$V_{th} = \text{ความเร็วทางทฤษฎี}$$

$$C_P = \text{ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านหลอด (Coefficient of Pitot Tube)}$$

