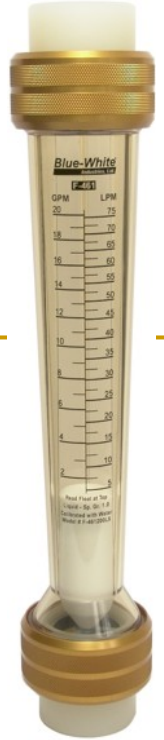
1301 300: Mechanical Measurement and Instruments

การวัดและเครื่องมือวัดการไหลทางวิศวกรรมเครื่องกล



Flow Measurement 1

การวัดและเครื่องมือวัดการไหล 1

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ธนรัฐ ศรีวีระกุล

การวัดอัตราการไหลของของเหลว 1

1. บทนำ

1.1) Bernoulli's equation – สมดุลพลังงาน

1.2) กฎทรงมวลในปริมาตรควบคุม

1.3) Reynolds number (Re)

2. เครื่องมือวัดการไหล (Flow meter)

2.1) Pitot-Static Pressure Probe

2.2) Obstruction Flow meter

a) **Orifice plate meter**

b) **Venturi meter**

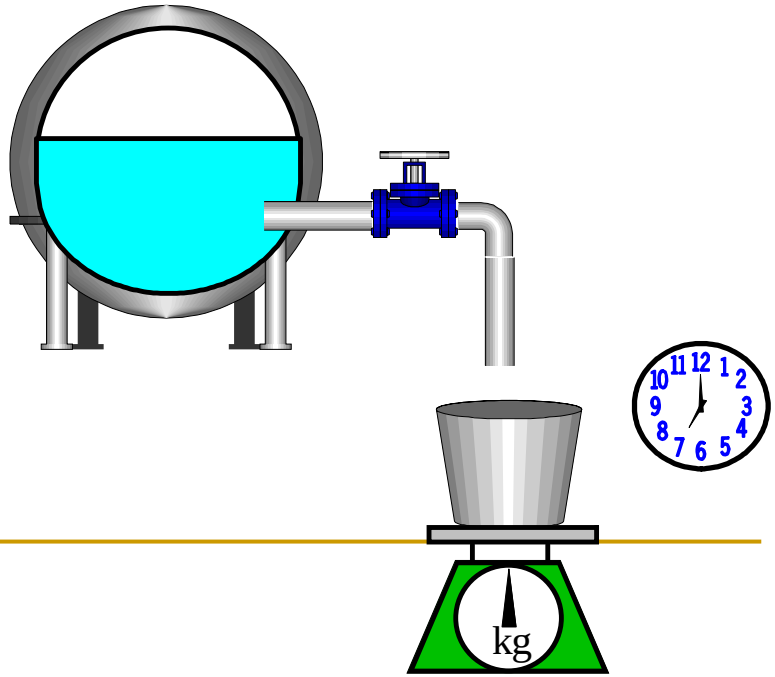
c) **ASME flow nozzle**

1. บทนำ

การวัดการไหล

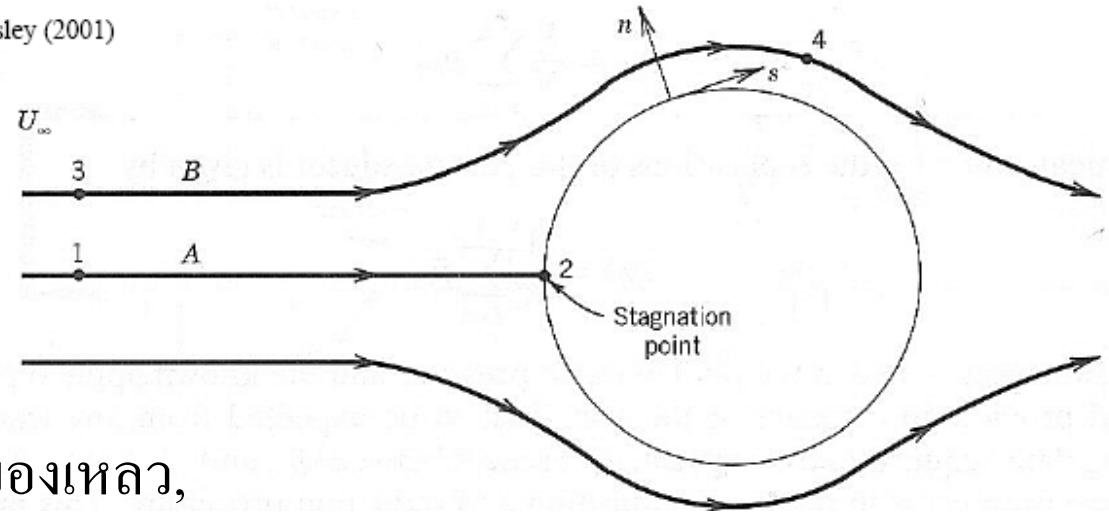
- **วัดความเร็วในการไหล**
- **วัดอัตราการไหล**

การวัดอัตราการไหล ด้วยเครื่องมือวัดอัตราการไหล ส่วนใหญ่ไม่ใช่การวัดค่าอัตราการไหลโดยตรง แต่จะใช้วิธีการวัดค่าตัวแปรของการไหลตัวอื่นแทนเช่น **ความเร็วในการไหล** หรือ **ความดันแตกต่างในระหว่างการไหล** แล้วนำมาคำนวณเป็นค่าอัตราการไหล



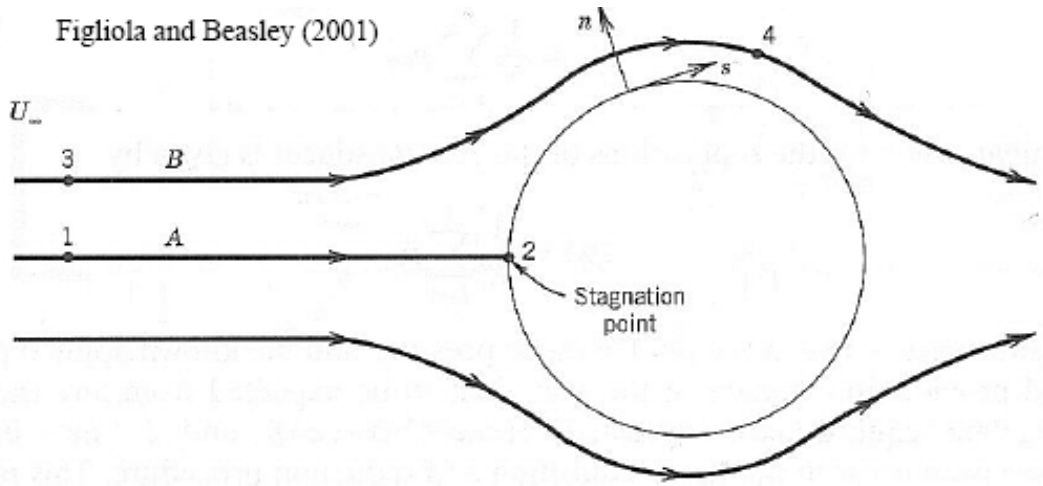
1.1 Bernoulli's equation (สมดุลพลังงาน)

Figliola and Beasley (2001)



- V = ความเร็วของของเหลว,
- ρ = ความหนาแน่นของของเหลว
- g = ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง,
- P = แรงดันสถิตย์,
- z = ระยะสูง

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z = constant$$



จากแนวการไหลที่ 1-2 เมื่อใช้สมการ Bernoulli วิเคราะห์จะได้

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g}$$

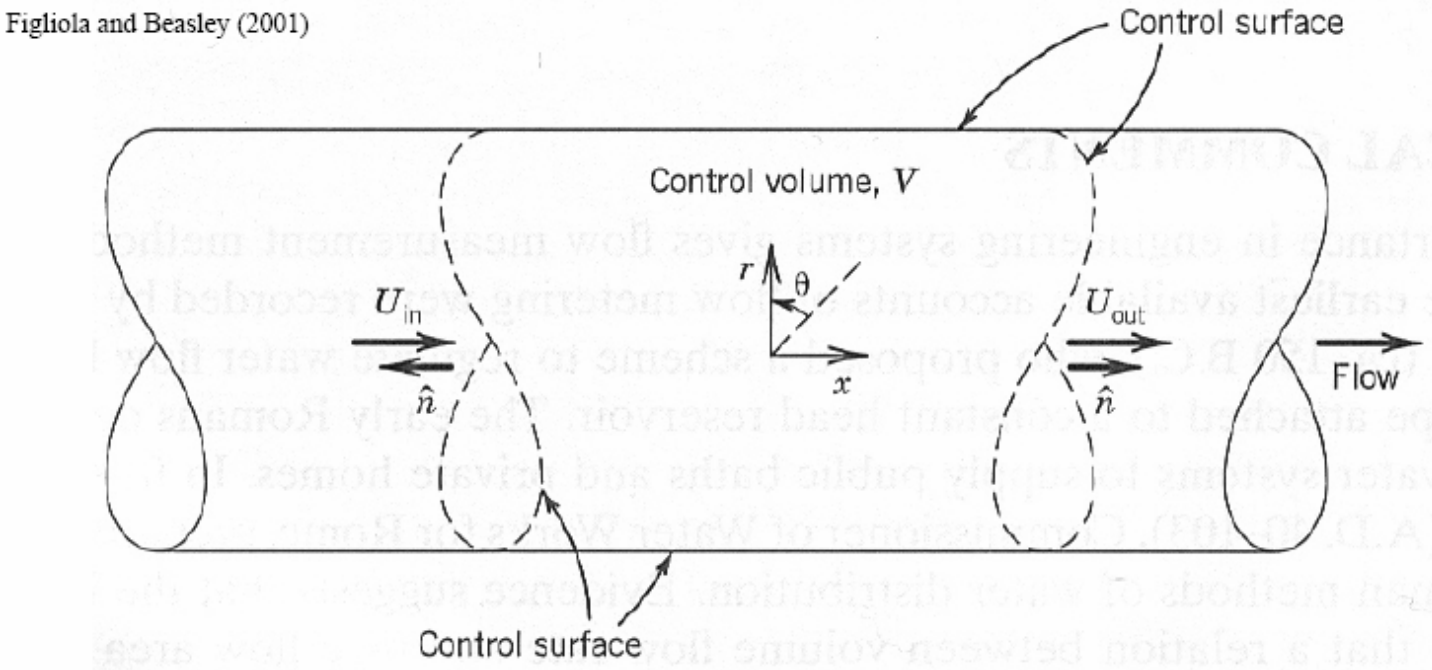
$V_2 = 0$ (stagnation point)

$$P_2 = P_1 + \rho \frac{V_1^2}{2}$$

P_2 เรียกว่า stagnation pressure ซึ่งจะมาค่ามากกว่า P_1 (ความดันในระบบ) เสมอและมีความสัมพันธ์กับความเร็วของของไหล (V_1)

-Stagnation แปลว่า หยุดนิ่ง

1.2 *กฎทรงมวลในปริมาตรควบคุม*



- ในปริมาตรควบคุม อัตราการไหลของมวลเข้าจะต้องเท่ากับอัตราการไหลของมวลออก(ในสภาวะคงที่)

- การไหลในสภาวะคงที่

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

$$\rho_{in} V_{in} A_{in} = \rho_{out} V_{out} A_{out} \quad \text{(Compressible fluid)}$$

- ($\rho_{in} = \rho_{out}$) หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานและการบีบอัด

$$V_{in} A_{in} = V_{out} A_{out} \quad \text{(Incompressible fluid)}$$

1.3 Reynolds number (Re)

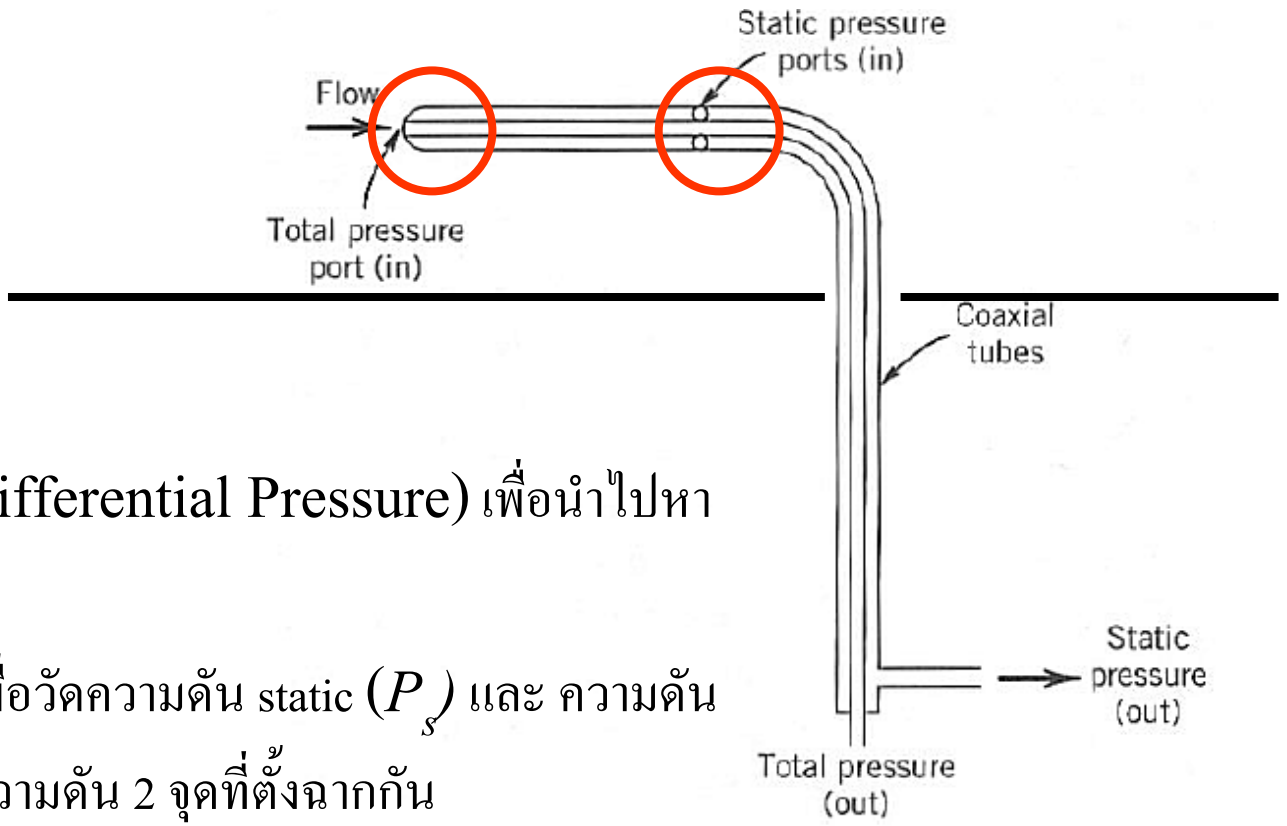
- ความเร็วของของไหลในรูปตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless) ใช้บ่งชี้ลักษณะการไหล (Laminar or Turbulent)
- ในการวัดของไหลค่า Re ถูกใช้อ้างอิงเพื่อใช้ในการปรับแก้ค่าการวัด (Compensation Factor)

$$\mathrm{Re} = \frac{Vd}{\nu} = \frac{Vd\rho}{\mu}$$

- V = average fluid velocity, d = diameter of circular pipe or hydraulic radius of a non-circular pipe, μ= fluid viscosity, ρ= fluid density, ν= μ/ρ= kinematics viscosity

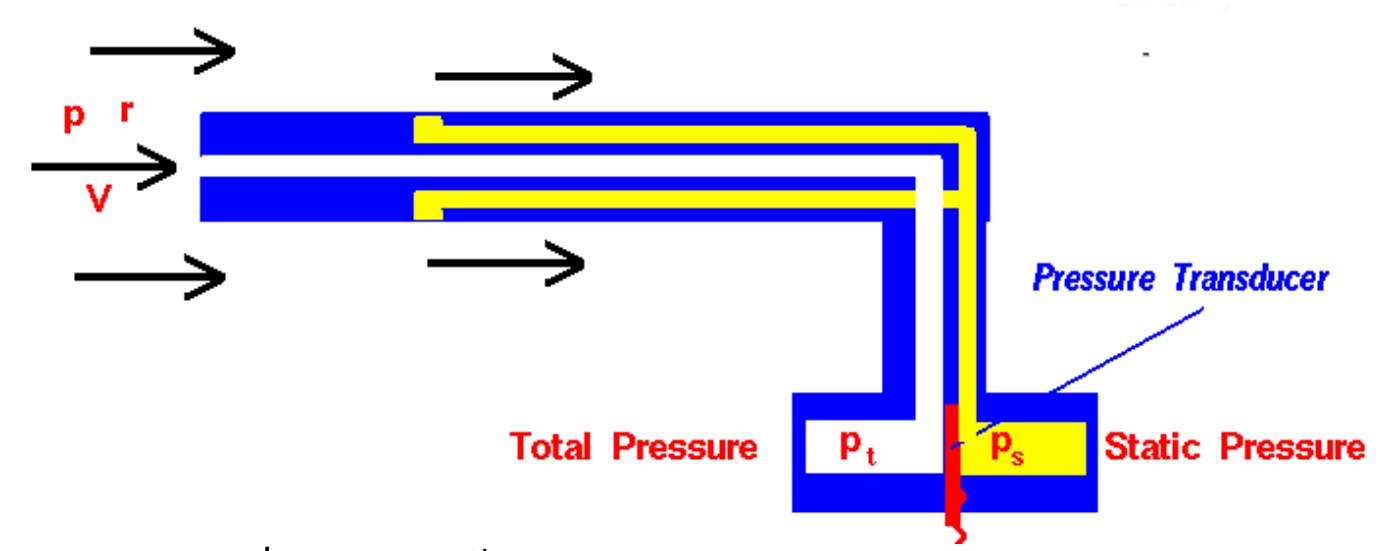
2. เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter)

2.1) Pitot-Static Pressure Probe



หลักการ

- วัดค่าความดันแตกต่าง (Differential Pressure) เพื่อนำไปหาค่าความเร็วในการไหล
- ประกอบด้วยท่อสองชั้น เพื่อวัดความดัน static (P_s) และ ความดันในระบบ (P_t) จากจุดวัดความดัน 2 จุดที่ตั้งฉากกัน
- ความเร็วจะประเมินได้จาก $(P_t\text{-}P_s)$

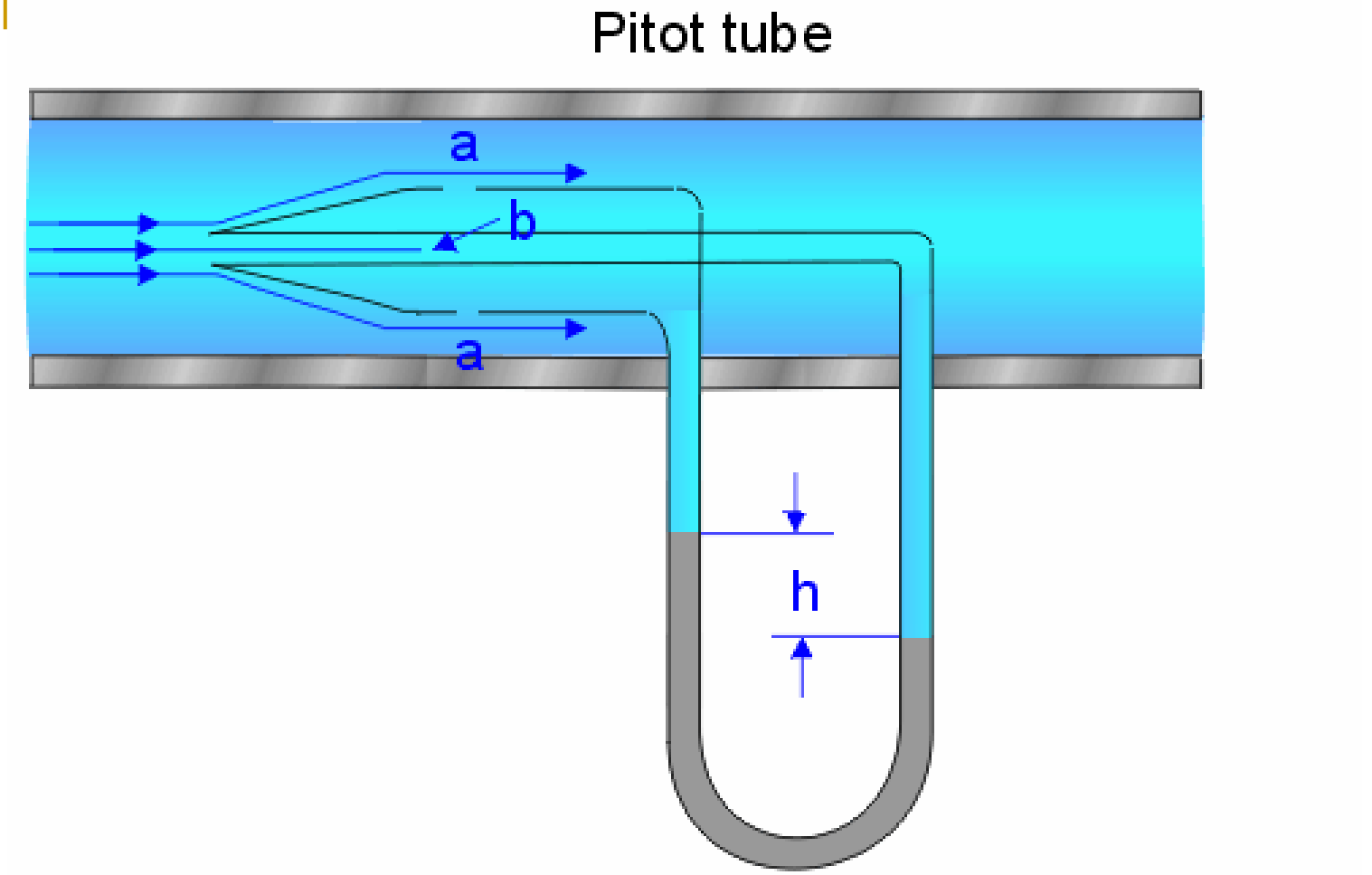


- ความเร็วหา โดยใช้สมการ Bernoulli
- Static pressure + Dynamic Pressure = Total Pressure

$$P_s + \rho\frac{V^2}{2} = P_t$$

- ความเร็วของไหลสามารถคำณวนจากความดันแตกต่างระหว่างความดันร่วม และความดันสถิตย์

$$V = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}}$$



การติดตั้ง Pitot tube เพื่อวัดการไหลในท่อ โดยต่อกับ Manometer

- ในการใช้งานจริงอาจจะมีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิเพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้นตามคุณสมบัติของของไหล

  ($C_p \sim 0.98 - 1$)

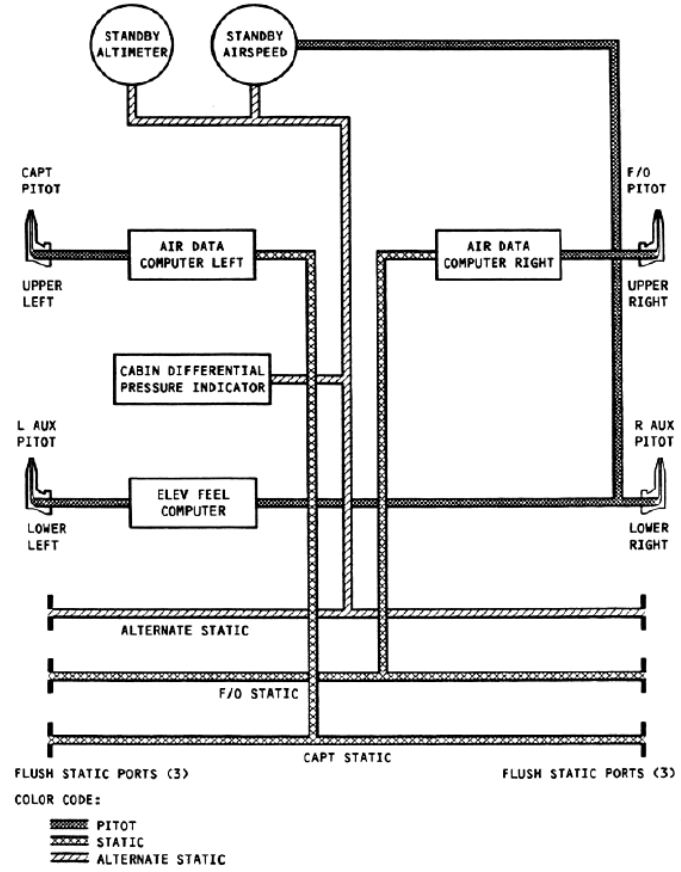
$$V = C_p \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}}$$

- ลักษณะการใช้งาน
  - ใช้ในการวัดความเร็วของไหลในท่อ ในอุโมงค์ลม
  - เป็นการวัด Mean flow velocity (ความเร็วเฉลี่ยของลำของไหล)
  - ปลายที่ใช้วัดจะถูกสอดเข้าไปในส่วนกลางของท่อ
  - ใช้วัดความเร็วของอากาศยาน

- ข้อเสีย
  - มีความอ่อนไหวกับแนวการไหล
  - ความเที่ยงตรง ±5% ค่าความผิดพลาดอาจมากขึ้นหาก velocity profile ของลำการไหลเปลี่ยนแปลง
  - ไม่เหมาะกับการวัดความเร็วของสารที่มีความสกปรก ความหนืดมาก เพราะอาจทำให้เกิดการอุดตันของ pitot tube
  - ไม่ควรใช้วัดที่ Re มากกว่า 500
- ข้อดี
  - ราคาถูก
  - ติดตั้งง่าย
  - มีผลกระทบกับการไหลน้อย

- ความดันสูญเสียจากการไหลผ่านตัววัดต่ำ (less energy consumption)

BOEING 787
OPERATIONS MANUAL

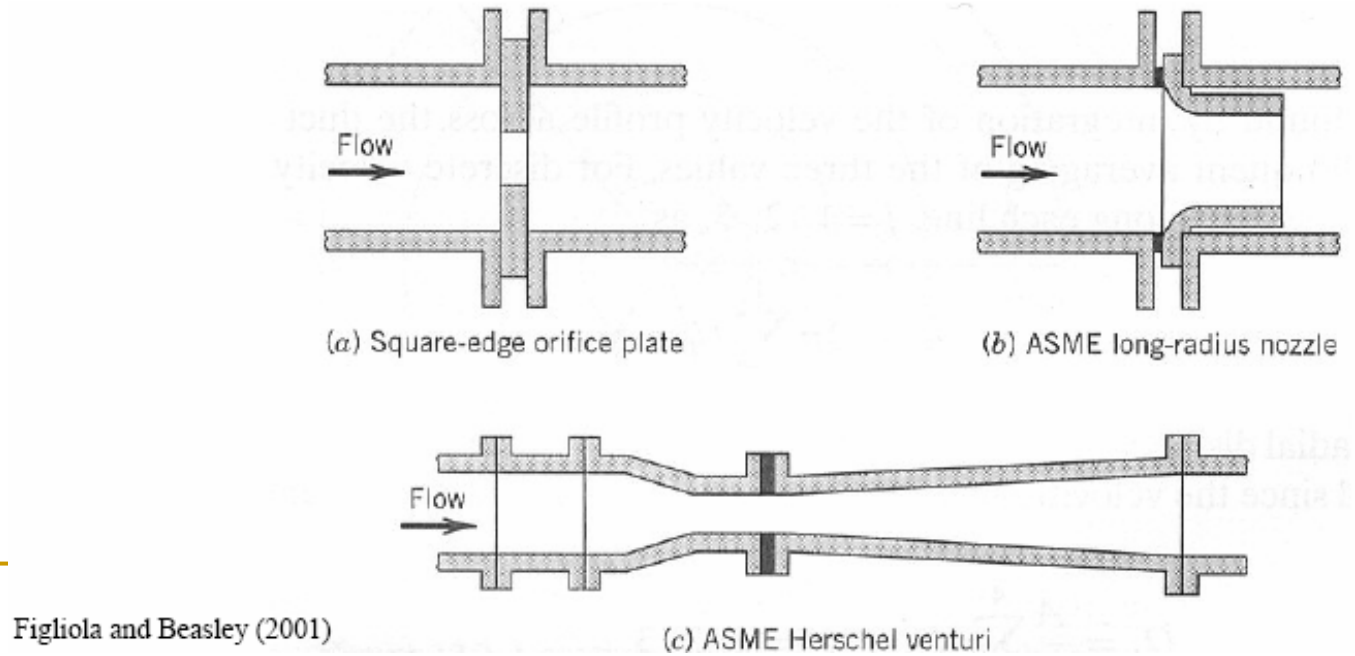


PITOT STATIC SCHEMATIC

2.2) Obstruction Flow meter

มีสามชนิดคือ

- Orifice plate meter, Venturi meter, flow nozzle
- ต้องทำการติดตั้งแทรกในระบบการไหล โดยให้ของไหลไหลผ่าน
- วัดค่าความดันแตกต่าง (Differential Pressure) เพื่อนำไปหาค่าความเร็วในการไหล



Figliola and Beasley (2001)

- ทำงานโดยการลดพื้นที่หน้าตัดของการไหล, เร่งความเร็วของไหล และ ลดความดันในระบบ
- ทำการตรวจวัดความดันแตกต่างระหว่างทางเข้าและทางออกของส่วนที่มีการขัดขวาง(ส่วนเครื่องมือวัด) เพื่อใช้ประเมินความเร็วของไหลในท่อ
- ภายใต้สมมุติฐานในการไหลผ่านอุปกรณ์วัดดังนี้
  - Isentropic, Isothermal
  - ไม่มีการอัดตัวของของไหลในสภาวะคงตัว (incompressible fluid), ρ =constant
  - ไหลเป็นแนวตรง

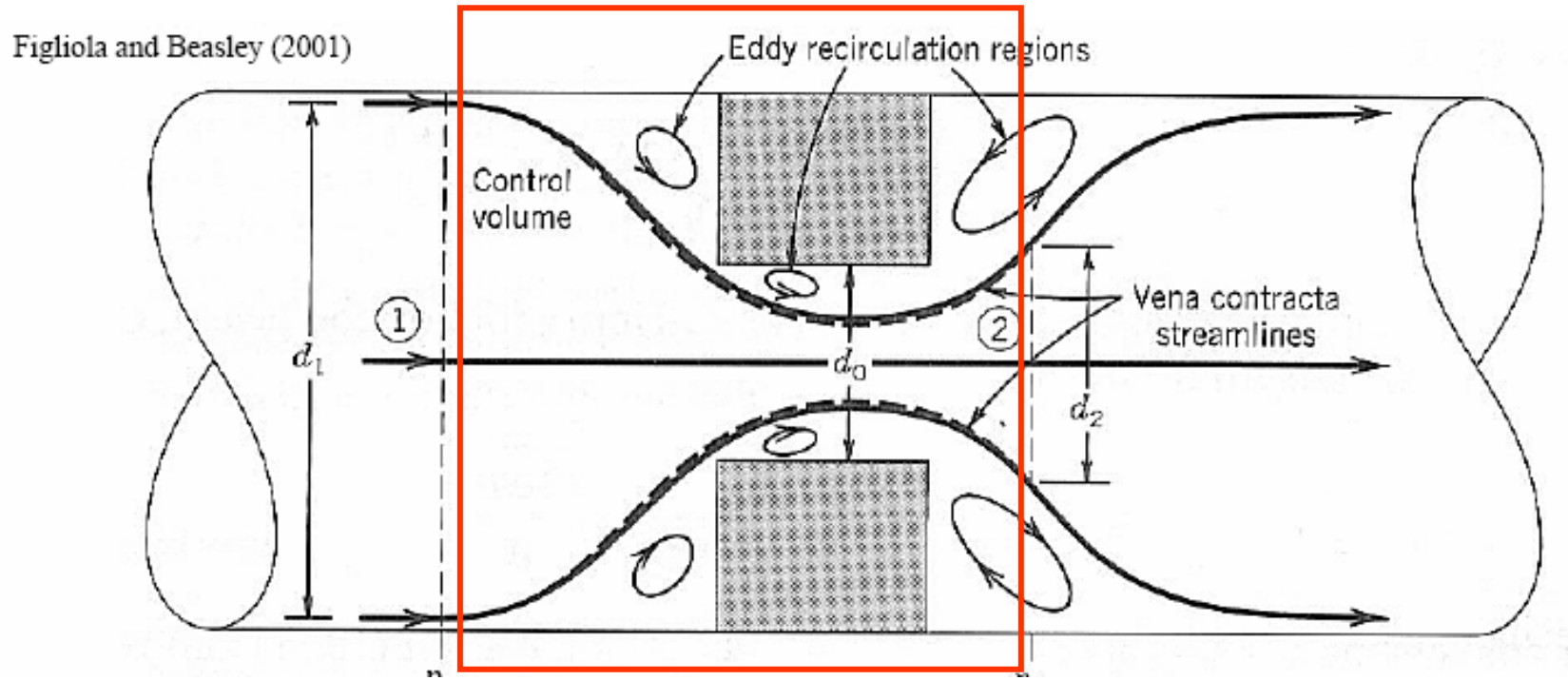
Bernoulli's Equation

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2$$

Conservation of Mass

$$V_{in} A_{in} = V_{out} A_{out}$$

$$Q_{in} = Q_{out}$$ (incompressible fluid)



- ต้องกำหนดขอบเขตของปริมาตรควบคุมเพื่อใช้วิเคราะห์การไหลคือผนังของท่อและพื้นที่ 1 และ 2 เพื่อใช้วัดความดันสถิต
- วิเคราะห์แนวการไหลจากจุดกึ่งกลางและสมมาตรทั้งท่อ
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในความสูง ($\Delta Z = 0$)

$$\frac{V_1^2}{2g}+\frac{P_1}{\rho_1 g}+Z_1=\frac{V_2^2}{2g}+\frac{P_2}{\rho_2 g}+Z_2$$

$$\rho_1=\rho_2;Z_1=Z_2$$

$$\frac{V_2^2-V_1^2}{2g}=\frac{P_1-P_2}{\rho\, g}.....(1)$$

$$A_1V_1=A_2V_2\rightarrow V_1=\frac{A_2}{A_1}V_2.....(2)$$

$$(2)\rightarrow(1):\quad V_2=\sqrt{\frac{2(P_1-P_2)}{\rho\left(1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}}.....(3)$$

$$A_2\times(3):\ A_2V_2=A_2\sqrt{\frac{2(P_1-P_2)}{\rho\left(1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}}$$

$$\therefore Q=A_2\sqrt{\frac{2(P_1-P_2)}{\rho\left(1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}}$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

$$\beta = \frac{d_2}{d_1}$$

- ค่าตัวคูณของการขวาง
- หาได้จากพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์
- ค่าสัมประสิทธิ (C_D) คือความแตกต่างระหว่างความต้านทานการไหลในทางทฤษฎีและในความเป็นจริง

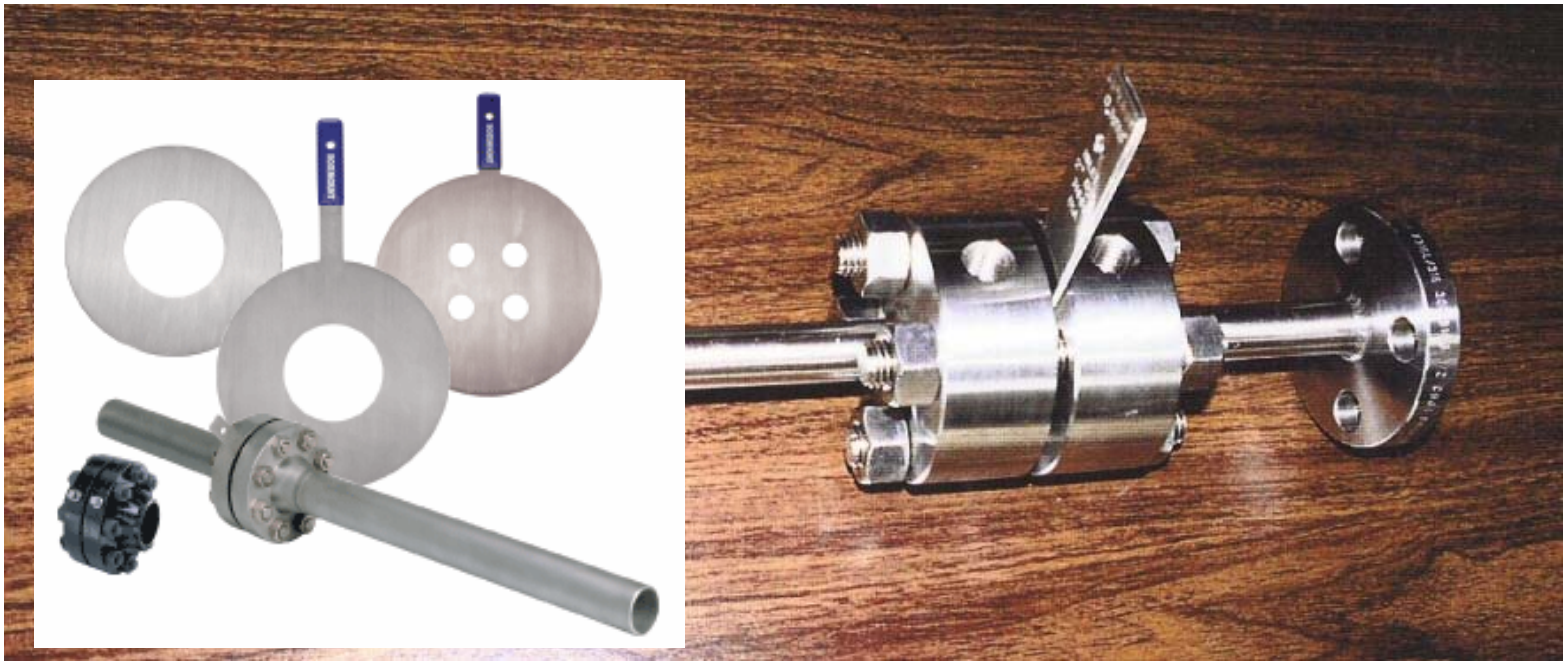
$$Q = C_D E A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

$$Q = K A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

- Q คือ อัตราการไหล
- C_D คือ สัมประสิทธิการไหลออก (Coefficient of Discharge)
- E คือ ตัวคูณของการขวาง
- $K = C_D E$
- K คือ สัมประสิทธิการวัด ซึ่งจะมีค่าสัมพันธ์กับ Re และได้จากการทดสอบปรับเทียบ

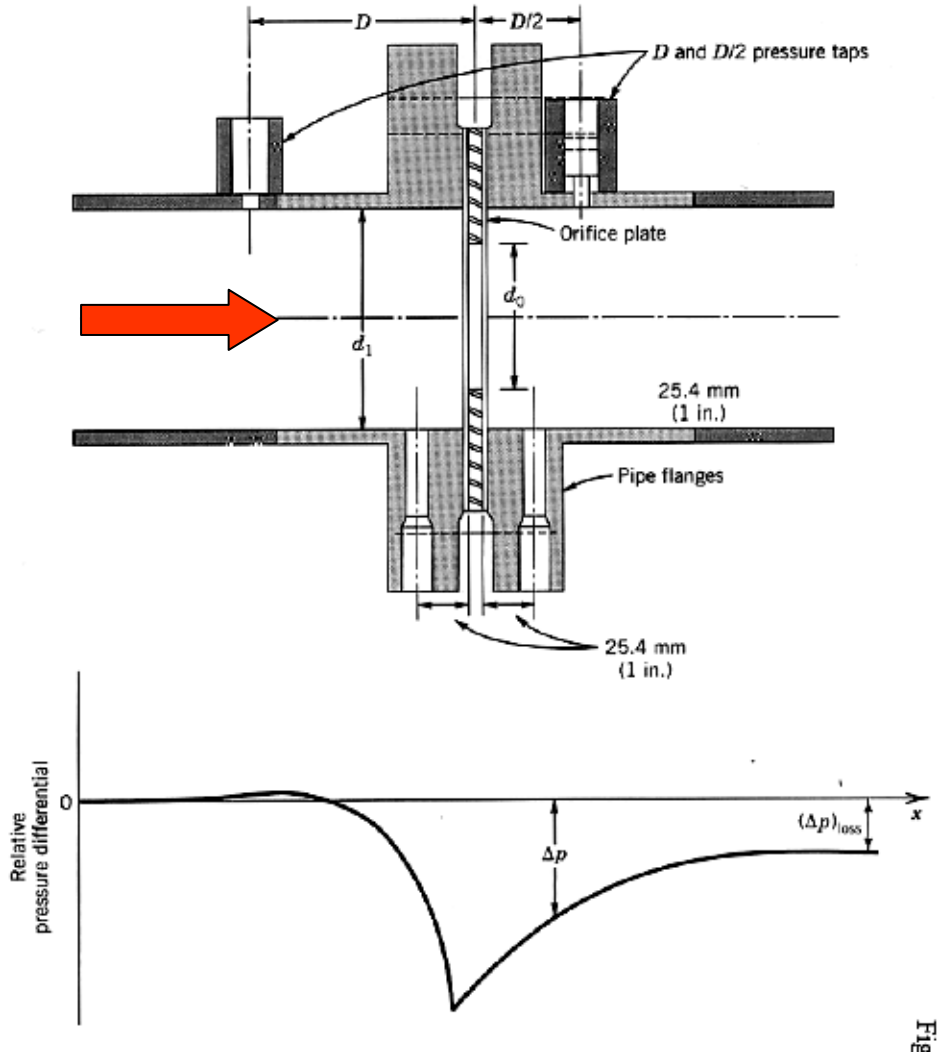
2.2.1) Orifice Plate Flow meter

- เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับการวัดของไหล
- รูปร่างเป็น แผ่นเจาะรู
- ปกติจะติดตั้งโดยการแทรกไว้ระหว่างหน้าแปลน

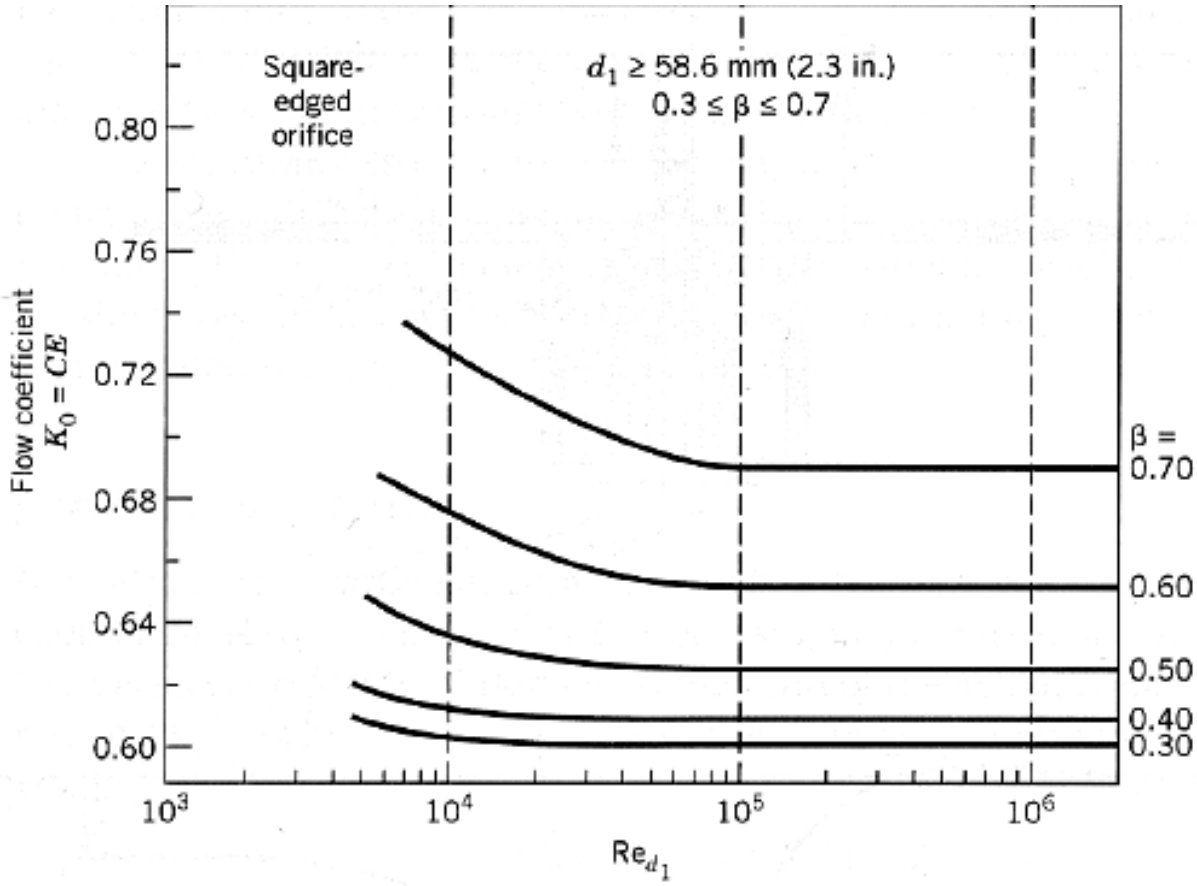


การเจาะช่องเพื่อต่อ port วัดความดันที่ทางเข้าและออกของแผ่น orifice สามารถทำได้สองรูปแบบคือ

- ห่างจากแผ่น orifice 25.4 mm ทั้งขาเข้าและขาออก
- ห่าง 1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางขาเข้า และ ½ เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางขาออกจากแผ่น



- ค่าสัมประสิทธิการไหล (K) มีค่าเป็นฟังค์ชั่นของ Re และจะมีค่าเกือบคงที่เมื่อค่า Re มากกว่า 10^5

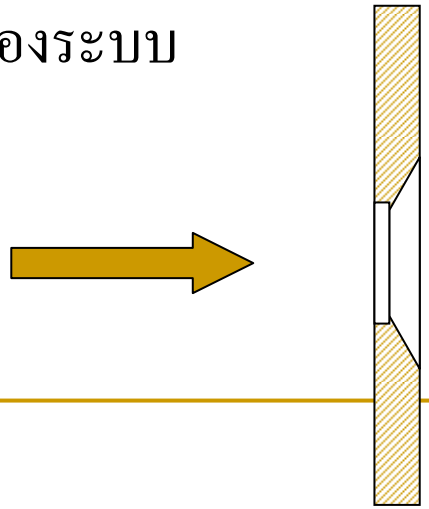


$$K_0 = \frac{1}{(1-\beta^4)^{1/2}}\,(0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8$$

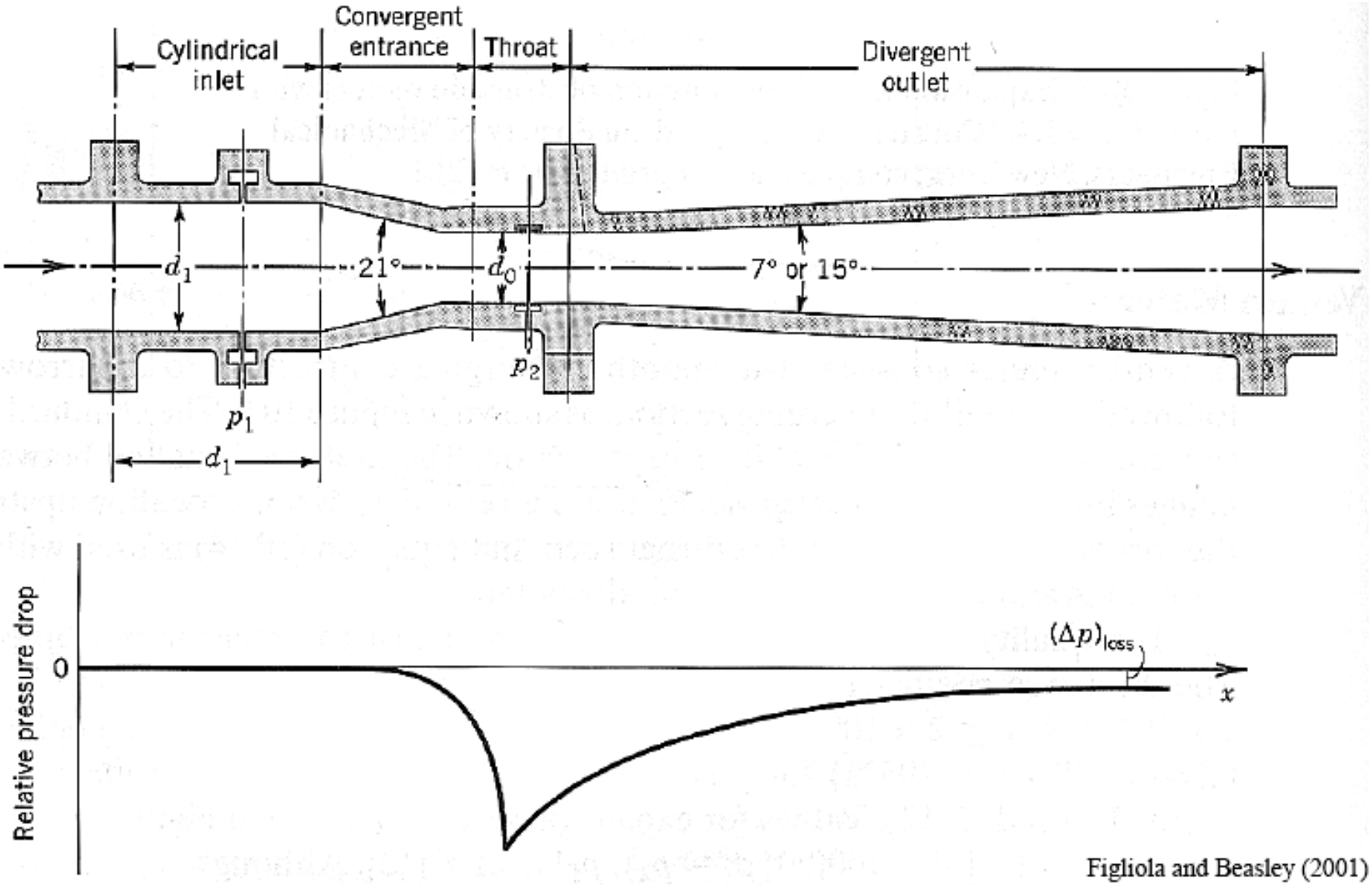
$$+ B_1 d_1^{-1}\beta^4(1-\beta^4)^{-1} - B_2 d_1^{-1}\beta^3 + 91.71\beta^{2.5}Re_{d_1}^{-0.75})$$

where B_1 = 0.09 (US) = 2.286 (SI) B_2 = 0.0337 (US) = 0.8560 (SI)

- ข้อดี
  - ราคาถูก
  - ติดตั้ง, ใช้งาน, ดูแลรักษา ง่าย
- ข้อเสีย
  - ก่อให้เกิดความดันตกคร่อมในระบบมาก เนื่องจากชิ้นส่วนของแผ่นorifice จะติดตั้งขวางการไหลโดยตรง
  - ต้องใช้พลังงานและปั้มมากกว่าระบบที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่น orifice เพื่อคง อัตราการไหล ของระบบ



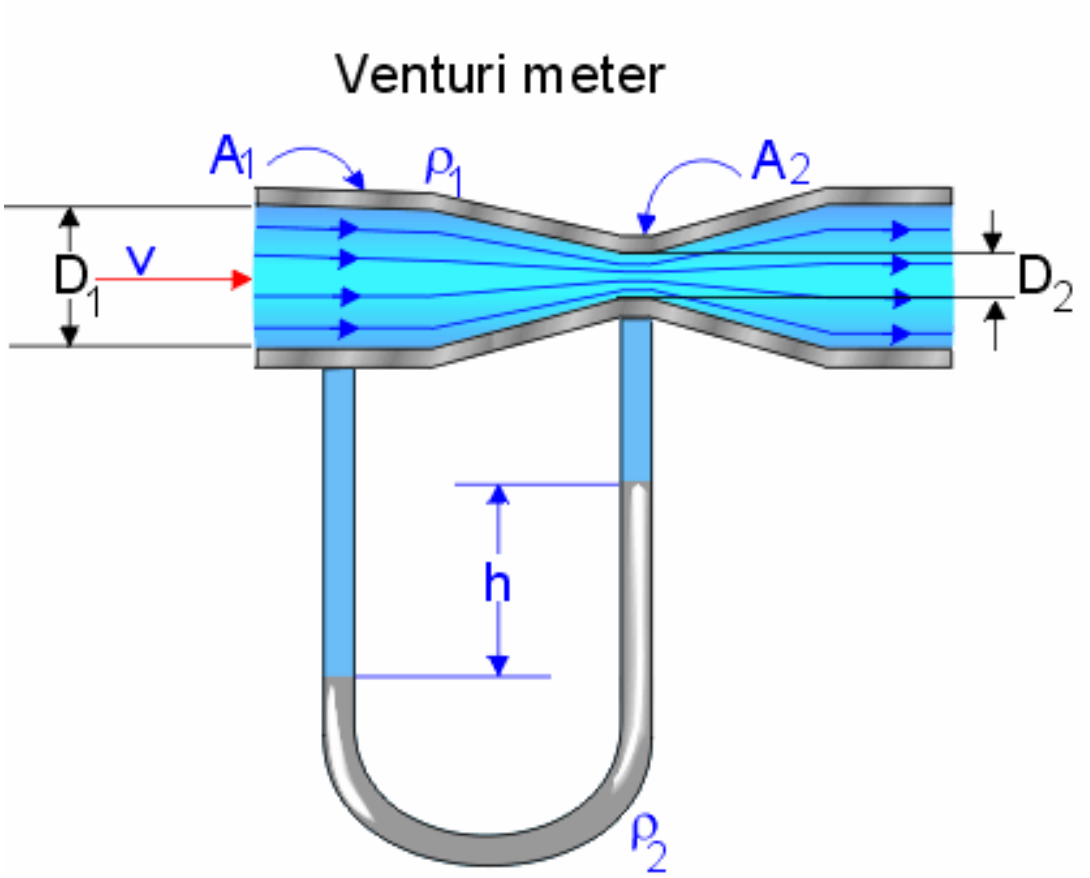
2.2.2) Venturi Meter



Figliola and Beasley (2001)

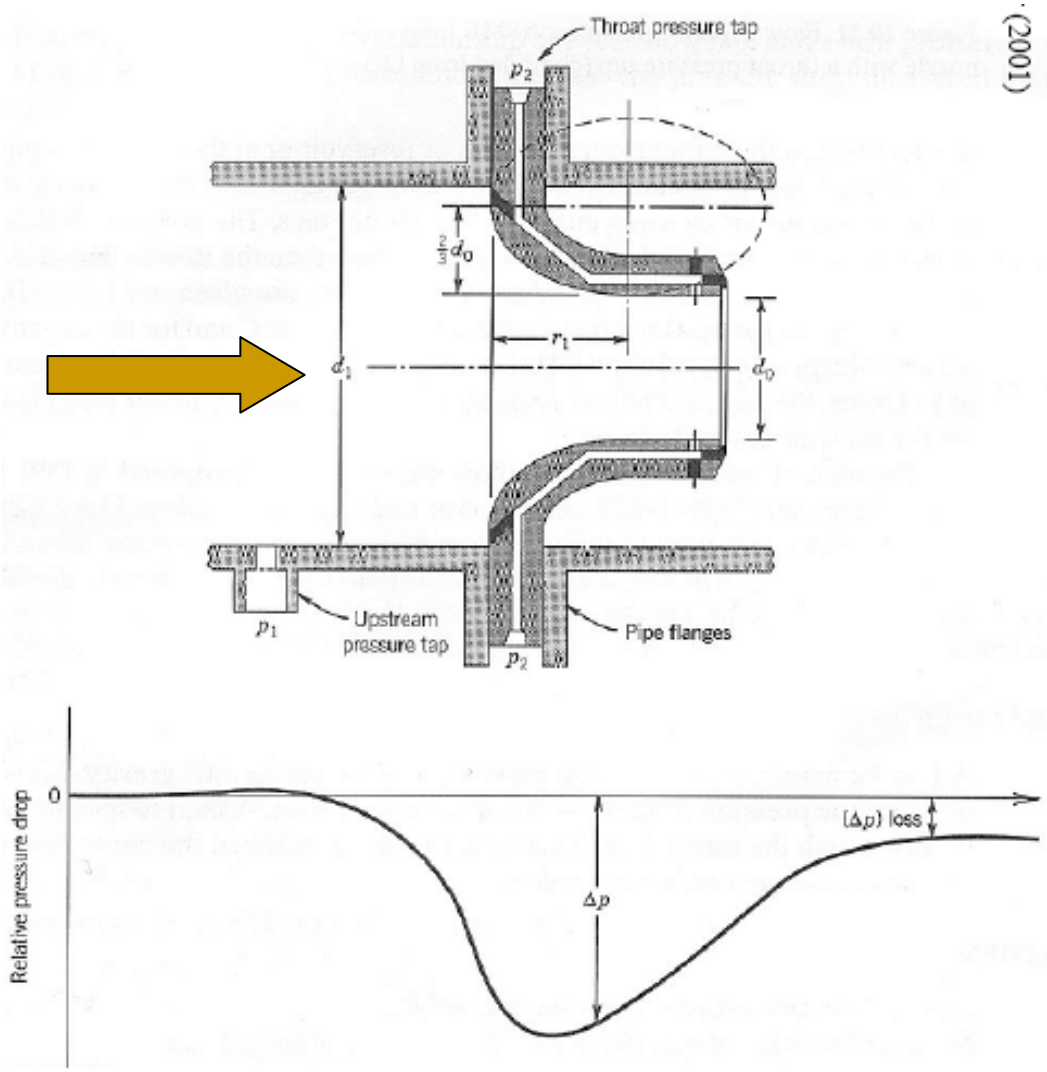
- เว็นจูรี่มิเตอร์ประกอบด้วย ท่อลดขนาดที่ขาเข้า, ข้อตรงและต่อด้วยท่อที่บานออก 7°หรือ 15° (มาตรฐาน)
- ติดตั้งระหว่างหน้าแปลนได้

- เจาะวัดความดันที่ ขาเข้าและที่ข้อตรง เพื่อที่จะใช้พื้นที่หน้าตัดตรงทางเข้าและพื้นที่หน้าตัดที่ข้อตรงในใส่ในสมการในส่วนของค่า A และ β



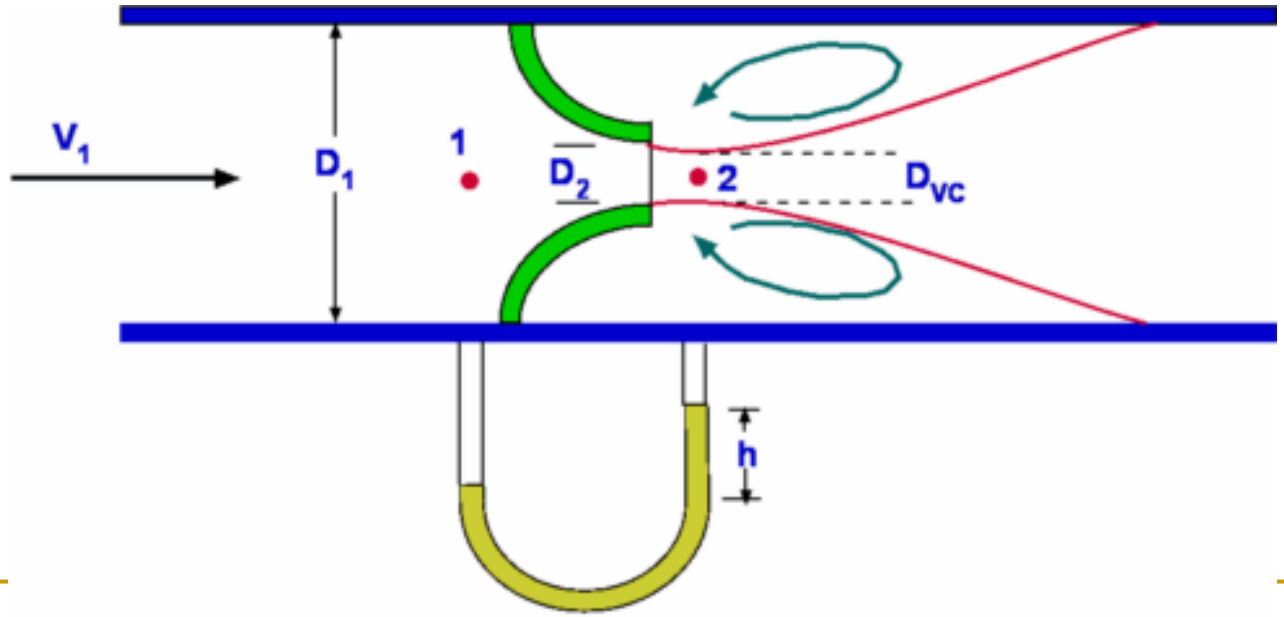
- ข้อดี
  - ความดันตกคร่อมน้อยกว่าแบบ orifice เนื่องจากการไหลผ่านนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยเป็นค่อยไปทำให้การเปลี่ยนแปลงความเร็วเกิดขึ้นช้ากว่า
  - ซึ่งส่งผลให้ระบบสามารถใช้พลังงานที่น้อยกว่าในการส่งของไหล
  - มีความแม่นยำ
  - มีค่าสัมประสิทธิการปล่อยสูง ($\mathbf{C_D} > 0.95$)
  - Re ต้อง $\geq 2\times10^5$
- ข้อเสีย
  - ราคาแพงกว่า เมื่อเทียบกับแบบ orifice และแบบ nozzle
  - ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากกว่าชนิดอื่น

2.2.3) ASME flow nozzle

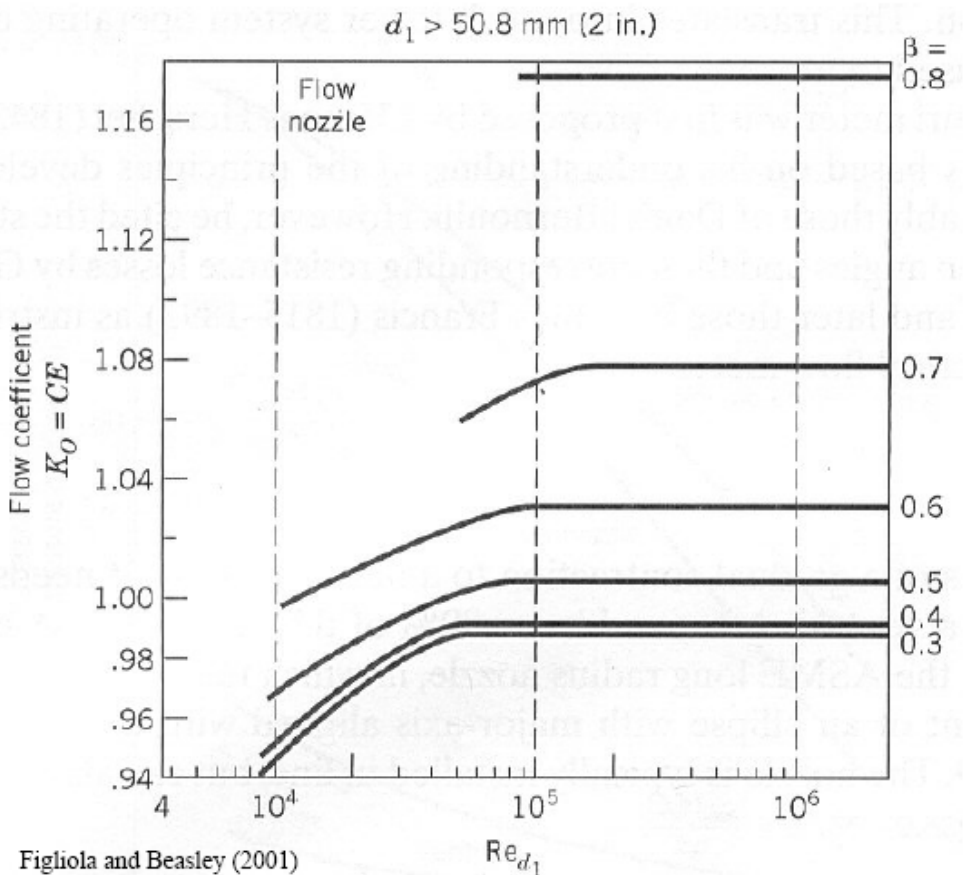


เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter)
ASME flow nozzle

- วัดความดันขาเข้าห่างจาก nozzle หนึ่งความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง
- ความดันขาออกวัดที่คอคอดของ nozzle หรือ ผนังตรงทางออกจาก nozzle



- ใน nozzle ที่มีรูปร่างตามมาตรฐาน สามารถใช้ชาร์ตในการหาค่าสัมประสิทธ์การไหลได้
- นอกนั้นต้องทำการสอบเทียบค่า



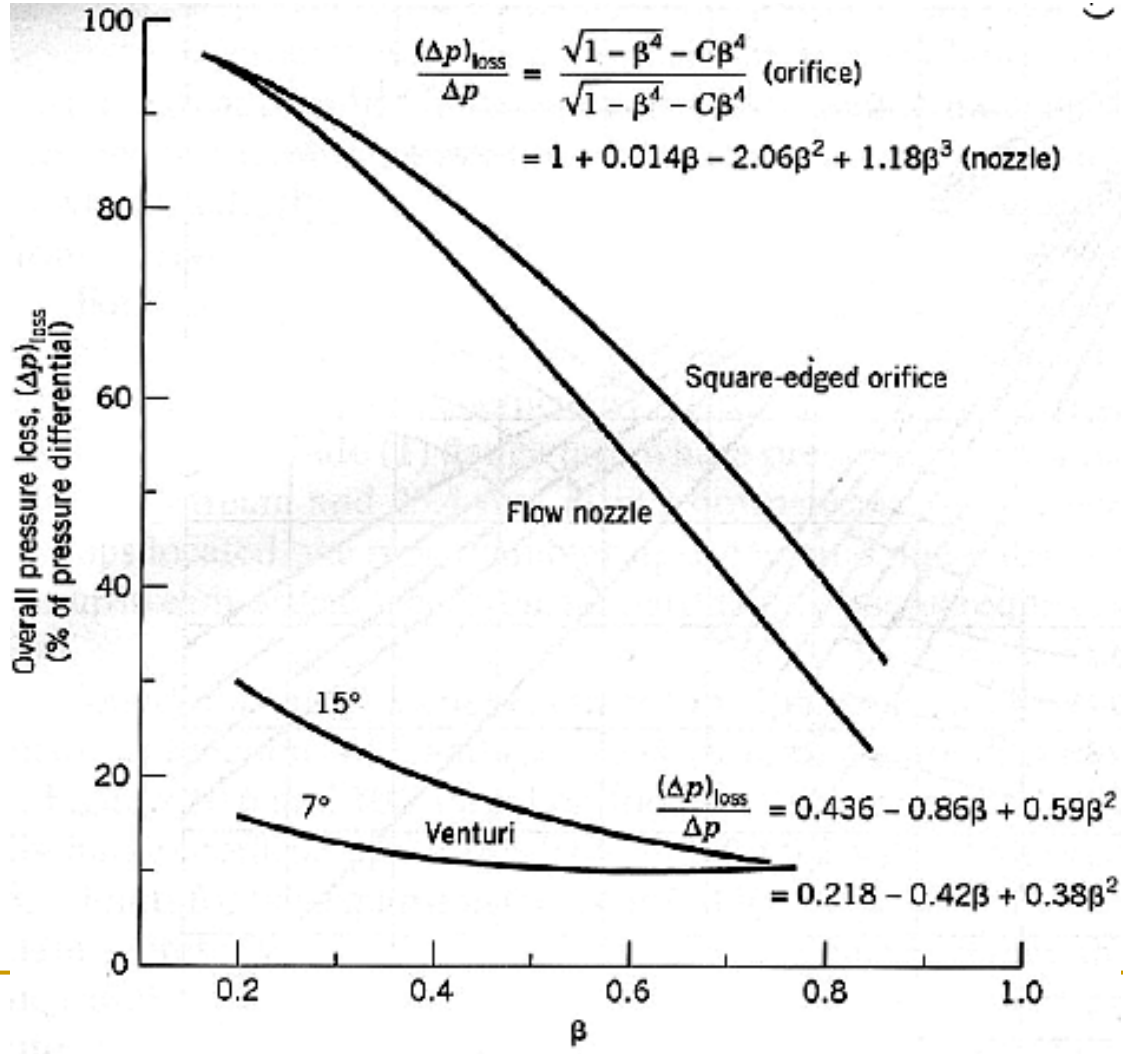
Figliola and Beasley (2001)

- ข้อดี
  - ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยกว่า เวนจูรี่
  - ราคาถูกกว่า เวนจูรี่
  - ความแม่นยำ
  - เหมาะกับการวัดของไหลความเร็วสูง
  - ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าแบบ Orifice

- ข้อเสีย
  - มีความดันตกคร่อมมากว่าแบบ venturi ทำให้ต้องใช้พลังงานปั๊มมากกว่า
  - ไม่เหมาะกับของเหลวที่เป็นสารแขวนลอย

เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter)

Obstruction Flow meter



เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter)

ผลกระทบจากการอัดตัวของของไหล

- ในการวัดการไหลของก๊าซ(หรือของเหลวอัดตัวได้)
- สามารถใช้ $\mathbf{C_D}$ เดิมของอุปกรณ์
- แต่เพิ่ม ค่าปรับแก้ (**Y**) เพื่อให้การวัดเที่ยงตรง

$$Q = YQ_I = C_D E A_o Y \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_1}}$$

เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter)

ผลกระทบจากการอัดตัวของของเหลว

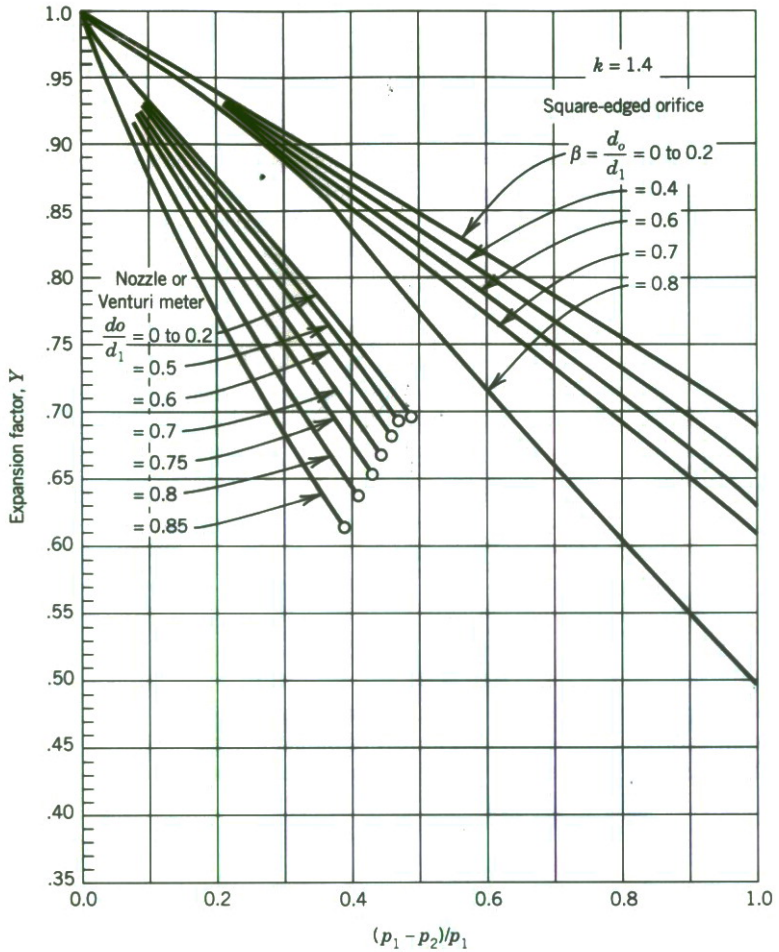


Figure 10.7 Expansion factors for common obstruction meters with $k = c_p/c_v = 1.4$. (Courtesy of the American Society of Mechanical Engineers, New York; compiled and reprinted from [2].1