

บทที่ 5

ระบบท่อ

5.1 Reynolds Number;

ในการพิจารณาพฤติกรรมของของไหล โดยเฉพาะการสูญเสียพลังงาน จำเป็นที่ต้องพิจารณาว่าการไหลนั้นเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) หรือเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ทั้งนี้ ปัจจัยที่ใช้ประกอบการพิจารณาคือ ค่าความหนาแน่นของของไหล (ρ) ค่าความหนืดของของไหล (μ) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (D) และความเร็วเฉลี่ยของของไหล (v)

Osborne Reynolds เป็นคนแรกที่อธิบายการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนด้วยตัวเลข ซึ่งเรียกว่า Reynolds Number (N_R) ดังสมการต่อไปนี้

ดังนั้น Reynolds Number จึงเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย

$$N_R < 2000$$

$$2000 < N_R < 4000$$

$$N_R > 4000$$

ตัวอย่าง 5.1 จงหาว่า การไหลในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ของกลีเซอรินที่ 25 °C เป็นการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อความเร็วเฉลี่ยของการไหลเท่ากับ 3.6 m/s ความหนาแน่น (ρ) และความหนืด (μ) ของกลีเซอรินเท่ากับ 1258 kg/m³ และ 9.60 x 10⁻¹ Pa-s ตามลำดับ

ตัวอย่าง 5.2 จงหาว่า การไหลในท่อทองแดงชนิด K (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02527 m และพื้นที่หน้าตัดท่อ 5.017 x 10⁻⁴ m²) ของน้ำที่ 70 °C ด้วยอัตราการไหล 285 L/min กำหนดให้ น้ำมีความหนืดจลน์ (ν) เท่ากับ 4.11 x 10⁻⁷ m²/s

ตัวอย่าง 5.3 จงคำนวณหาช่วงของความเร็วจนเปลี่ยนสำหรับการไหลแบบ Transition ของน้ำมัน SEA 10 ที่อุณหภูมิ 15 °C ในท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 52.5 mm กำหนดให้ น้ำมัน SEA 10 มีความถ่วงจำเพาะ 0.89 และความหนืด (μ) 1×10^{-1} N-s/ m²

5.2 สมการดาร์ซี (Darcy's Equation)

จากสมการทั่วไปของสมการพลังงาน

เมื่อ h_A คือพลังงานที่ได้จากปั๊ม

h_R คือพลังงานที่น้ำเปลี่ยนเป็นพลังงานกล หรือพลังงานที่นำไปใช้กับกังหัน

h_L คือพลังงานที่สูญเสียไปในระบบ

พลังงานที่สูญเสียไปในระบบนั้น มีการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานเป็นการสูญเสียหลัก โดยสามารถหาค่าได้จากสมการดังต่อไปนี้ ซึ่งเรียกว่า สมการดาร์ซี (Darcy's Equation)

- เมื่อ h_L คือ พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากแรงเสียดทาน
- L คือ ความยาวของท่อหรือความยาวของการไหล (m หรือ ft)
- D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (m หรือ ft)
- v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s หรือ ft/s)
- f คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction factor)
- สมการข้างต้น สามารถใช้ได้กับสภาพการไหลได้ทั้งแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

5.3 การสูญเสียพลังงานในการไหลแบบราบเรียบ (Friction Loss in Laminar Flow)

การสูญเสียพลังงานในการไหลแบบราบเรียบสามารถหาค่าได้จากสมการของ Hagen-Poiseuille ดังนี้

สมการข้างต้น ใช้ในกรณีที่ $N_R < 2000$ หรือเป็นการไหลแบบราบเรียบ อย่างไรก็ตาม สมการของดาร์ซีก็สามารถใช้กับการไหลแบบราบเรียบได้เช่นกัน ดังนั้น

ตัวอย่าง 5.4 จงคำนวณหาพลังงานที่สูญเสียไป เมื่อกลีเซอรินที่ 25 °C ไหลในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ยาว 30 m ด้วยความเร็วเฉลี่ย 4.0 m/s กำหนดให้ กลีเซอรินที่ 25 °C มีความหนาแน่น (ρ) 1258 kg/m³ และความหนืด (μ) 9.60×10^{-1} Pa-s

5.4 การสูญเสียพลังงานในการไหลแบบปั่นป่วน (Friction Loss in Turbulent Flow)

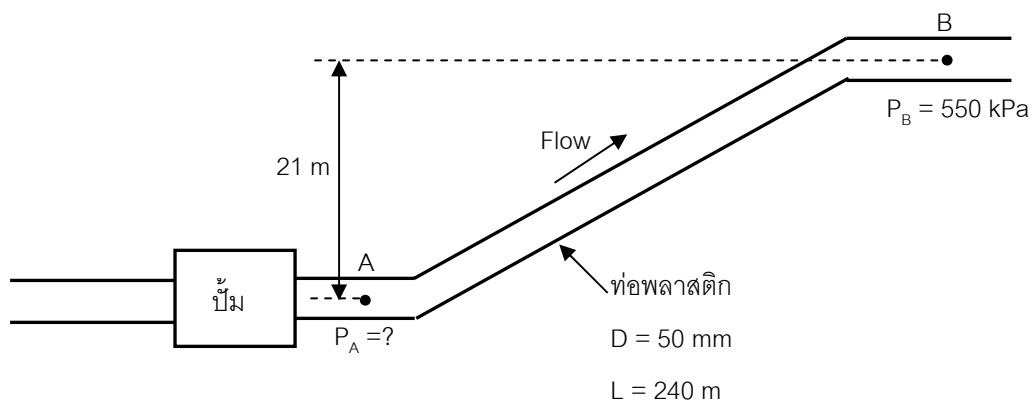
สำหรับการสูญเสียพลังงานในการไหลแบบปั่นป่วนสามารถนำสมการของดาร์ซีมาใช้ได้ โดยสัมพันธ์กับความเสียดทาน (f) หาค่าได้จาก Moody Diagram ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Reynolds Number (N_R) และอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเฉลี่ยภายใน (D) กับ ความขรุขระเฉลี่ย (ϵ) ทั้งนี้ ความขรุขระเฉลี่ย (ϵ) ของท่อขึ้นกับชนิดของท่อและอายุการใช้งานของท่อ

ตัวอย่าง 5.5 จงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) สำหรับน้ำที่ 70°C ไหลด้วยความเร็ว 9.14 m/s ในท่อเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 25 mm กำหนดให้ น้ำที่ 70°C มีความหนืดจลน์ (ν) เท่ากับ $4.11 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ ความขรุขระเฉลี่ย (ϵ) เท่ากับ $2.4 \times 10^{-4}\text{ m}$

ตัวอย่าง 5.6 จากตัวอย่าง 5.5 ถ้าความเร็วเฉลี่ยของน้ำเปลี่ยนมาเป็น 0.14 m/s จงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f)

ตัวอย่าง 5.7 จงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) สำหรับเอทิลแอลกอฮอล์ที่ 25°C ไหลด้วยความเร็วเฉลี่ย 5.3 m/s ในท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน $D = 0.0381\text{ m}$ และความขรุขระเฉลี่ย (ε) เท่ากับ $4.6 \times 10^{-4}\text{ m}$ กำหนดให้ เอทิลแอลกอฮอล์ที่ 25°C มีความหนาแน่น (ρ) 787 kg/m^3 และความหนืด (μ) $1.00 \times 10^{-3}\text{ Pa-s}$

ตัวอย่าง 5.8 จากรูป ในกระบวนการผลิตทางเคมี เบนซีนที่ 50°C (ความถ่วงจำเพาะ 0.86) ไหลสู่จุด B ซึ่งมีความดัน 550 kPa ถ้ามีอัตราการไหล 110 L/min จงคำนวณหาความดันที่ต้องออกจากปั๊ม



ตัวอย่างที่ 5.9 น้ำที่อุณหภูมิ 20°C ไหลอยู่ในท่อเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 cm จง
คำนวณหาอัตราการไหลของน้ำในท่อนี้ กำหนดให้ ความลาดเชิงชลศาสตร์ (h_L/L) เท่ากับ 0.006
และน้ำที่ 20°C มีความหนืดเท่ากับ $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ท่อมีความขรุขระ (ε) เท่ากับ 0.046

5.5 สมการสำหรับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Equation for the Friction Factor)

นอกจากการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) ด้วย Moody Diagram แล้วนั้น ยังมีสมการอื่น ๆ อีกที่สามารถจะวิเคราะห์และหาค่าดังกล่าวได้ กล่าวคือ สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ($N_R < 2000$) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

สำหรับการไหลที่อยู่ในช่วง Transition ($2000 < N_R < 4000$) จะไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) ได้ แต่สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ($N_R > 4000$) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

5.6 สมการของ Hazen-Williams (Hazen-Williams Formula for Water Flow)

สมการของ Hazen-Williams เป็นอีกสมการหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการนำมาใช้เพื่อการออกแบบและวิเคราะห์ระบบน้ำ แต่สมการนี้ก็ยังมีข้อจำกัดที่ว่าเหมาะสำหรับการไหลของน้ำในท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 in แต่เล็กกว่า 6 ft และความเร็วของการไหลไม่ควรเกิน 10.0 ft/s ณ อุณหภูมิน้ำที่ 60 °C ซึ่งหากมากกว่าหรือน้อยกว่านี้จะเกิดความคลาดเคลื่อนได้

สมการของ Hazen-Williams ในหน่วยอังกฤษ แสดงดังต่อไปนี้

เมื่อ v = ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (ft/s)

C_h = ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William (ไม่มีหน่วย)

R = รัศมีไฮดรอลิกของท่อ (ft) สำหรับท่อวงกลม $R = \frac{D}{4}$

$s = \frac{h_L}{L} = \frac{\text{Energy loss}}{\text{Length of conduit}} = \frac{\text{ft}}{\text{ft}}$

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William (C_h) ขึ้นกับลักษณะของผิวท่อเท่านั้นดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William (C_h)

Type	C_h	
	Average for New, Clean pipe	Design Value
Steel, ductile iron, or cast iron with centrifugally applied cement or bituminous lining	150	140
Plastic, copper, brass, glass	140	130
Steel, cast iron, uncoated	130	100
Concrete	120	100
Corrugated steel	60	60

สมการของ Hazen-Williams ในหน่วย SI แสดงดังต่อไปนี้

เมื่อ v = ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

C_h = ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William (ไม่มีหน่วย)

R = รัศมีชลศาสตร์ของท่อ (m) สำหรับท่อวงกลม $R = \frac{D}{4}$

$s = \frac{h_L}{L} = \frac{\text{Energy loss}}{\text{Length of conduit}} = \frac{m}{m}$

ตัวอย่าง 5.10 จงคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่ไหลในท่อเหล็กยาว 304.8 m ซึ่งมีการสูญเสียพลังงาน 6.1 m และคำนวณหาอัตราการไหล กำหนดให้ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William (C_h) เท่ากับ 130

นอกจากสองสมการของ Hazen-William แล้ว ยังสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ ดังนี้

หน่วยอังกฤษ

$$v = 1.32 C_h R^{0.63} s^{0.54}$$

$$Q = 1.32 A C_h R^{0.63} s^{0.54}$$

$$h_L = L \left[\frac{Q}{1.32 A C_h R^{0.63}} \right]^{1.852}$$

$$D = \left[\frac{2.31 Q}{C_h s^{0.54}} \right]^{0.380}$$

เมื่อ

$$v = \text{ft/s}$$

$$Q = \text{ft}^3/\text{s}$$

$$A = \text{ft}^2$$

$$h_L, L, R \text{ และ } D = \text{ft}$$

$$s = \text{ft/ft (ไม่มีหน่วย)}$$

หน่วย SI

$$v = 0.85 C_h R^{0.63} s^{0.54}$$

$$Q = 0.85 A C_h R^{0.63} s^{0.54}$$

$$h_L = L \left[\frac{Q}{0.85 A C_h R^{0.63}} \right]^{1.852}$$

$$D = \left[\frac{3.59 Q}{C_h s^{0.54}} \right]^{0.380}$$

$$v = \text{m/s}$$

$$Q = \text{m}^3/\text{s}$$

$$A = \text{m}^2$$

$$h_L, L, R \text{ และ } D = \text{m}$$

$$s = \text{m/m (ไม่มีหน่วย)}$$

นอกจากจะใช้สมการของ Hazen-William แล้ว เพื่อคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ต้องการแล้ว ยังสามารถใช้ Nomograph เพื่อหาค่าดังกล่าวได้จากกราฟที่ให้มาเป็นกราฟเฉพาะ $C_h = 100$ หากต้องการนำไปใช้เพื่อหาในกรณีอื่น ๆ ที่ $C_h \neq 100$ สามารถนำสมการต่อไปนี้ไปใช้ได้

(Velocity)

(Volume flow rate)

(Pipe Diameter)

(Head loss/Length)

เมื่อ ตัวแปรที่ห้อยด้วย “c” เป็นค่าที่ต้องการหาสำหรับ $C_h \neq 100$ และตัวแปรที่ห้อยด้วย “100” เป็นค่าที่อ่านได้จาก Nomograph ณ $C_h = 100$

5.7 การสูญเสียรอง (Minor Losses)

การสูญเสียพลังงานนั้นเป็นส่วนหนึ่งกับ velocity head ดังสมการต่อไปนี้

เมื่อ h_L = การสูญเสียรอง

K = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย เป็นค่าที่ขึ้นกับชนิดและรูปร่างของวัตถุที่ของเหลวไหลผ่าน

v_1 = ความเร็วเฉลี่ย ณ ตำแหน่งที่พิจารณาการสูญเสียรอง

การสูญเสียรอง พิจารณาที่สภาวะต่าง ๆ ดังนี้

5.7.1 การขยายหน้าตัดท่อทันทีทันใด

เมื่อของไหลไหลจากท่อที่มีขนาดเล็กไปสู่ท่อที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งเป็นท่อที่มีการขยายพื้นที่หน้าตัดการไหลอย่างทันทีทันใด ความเร็วจะลดลงเมื่อไหลเข้าสู่ท่อที่มีขนาด

พื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่กว่า เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน การสูญเสียดังกล่าวนี้ หาได้จากสมการดังนี้



เมื่อ v_1 = ความเร็วเฉลี่ย ณ ท่อที่มีขนาดเล็กกว่า และกำลังไหลไปสู่ท่อที่มีขนาดใหญ่กว่า

K = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของท่อทั้งสอง

$$= \left[1 - \frac{A_1}{A_2} \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2$$

ตัวห้อย “1” = ท่อที่มีขนาดเล็กกว่า

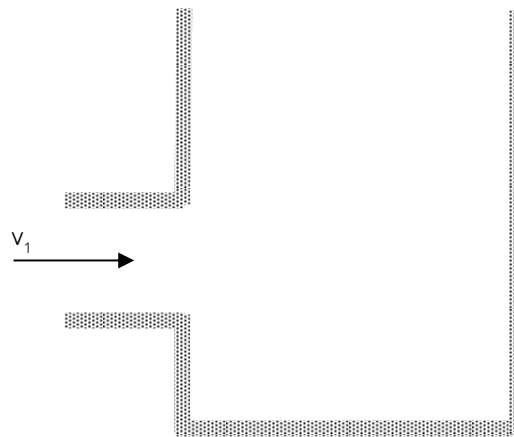
ตัวห้อย “2” = ท่อที่มีขนาดใหญ่กว่า

ตัวอย่าง 5.11 จงคำนวณหาพลังงานที่สูญเสียไป เมื่อน้ำไหลด้วยอัตราการไหล 100 L/min จากท่อที่มีพื้นที่หน้าตัด $5.017 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ไปยังท่อที่มีพื้นที่หน้าตัด $4.282 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ และ $K = 0.72$

ตัวอย่าง 5.12 จากข้อมูลในตัวอย่างที่ 5.10 จงคำนวณหาความแตกต่างของความดันระหว่างท่อขนาดเล็กกับท่อขนาดใหญ่กว่า

5.7.2 การสูญเสียที่ทางออก

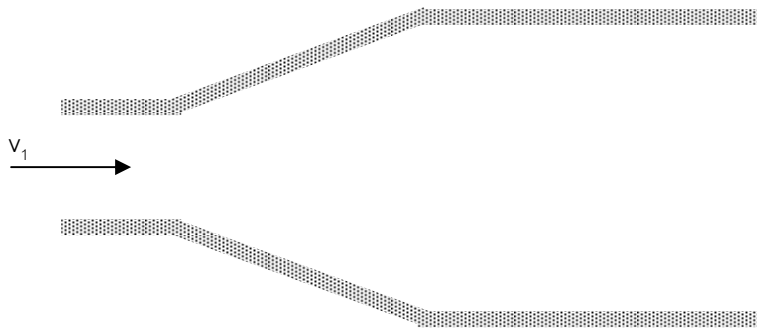
เมื่อของไหลไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่หรือถึงน้ำขนาดใหญ่ ดังรูป ความเร็วของการไหลที่เข้าสู่อ่างนั้นจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ พลังงานที่สูญเสียที่ทางออกจากท่อ หาได้จากสมการต่อไปนี้



เมื่อ h_L = การสูญเสียรองที่ทางออก

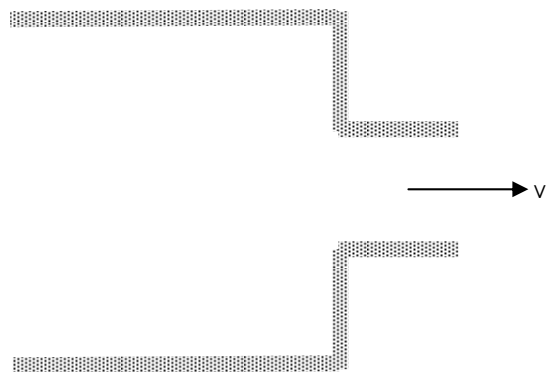
$$K = 1.0$$

5.7.3 การขยายหน้าตัดการไหลอย่างค่อย ๆ เป็นค่อย ๆ ไป



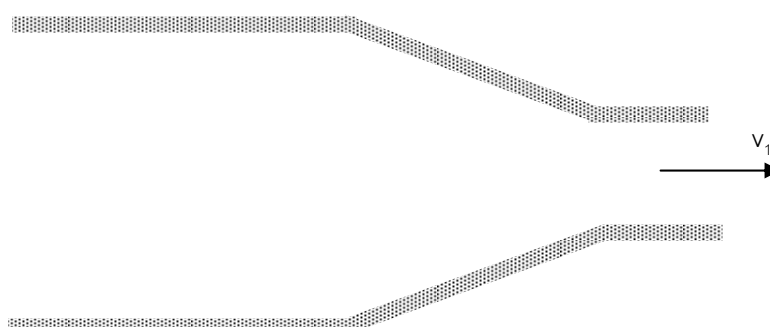
การสูญเสียพลังงานสำหรับการไหลของของเหลวจากหน้าตัดการไหลที่เล็กกว่าไปยังหน้าตัดการไหลที่ใหญ่กว่า หาได้จากสมการ ดังนี้

5.7.4 การลดขนาดหน้าตัดการไหลอย่างทันทีทันใด



การสูญเสียพลังงานสำหรับการไหลของของเหลวจากหน้าตัดการไหลที่มีการลดหน้าตัดการไหลอย่างทันทีทันใด หาได้จากสมการ ดังนี้

5.7.5 การลดขนาดหน้าตัดการไหลอย่างค่อย ๆ เป็น ค่อย ๆ ไป

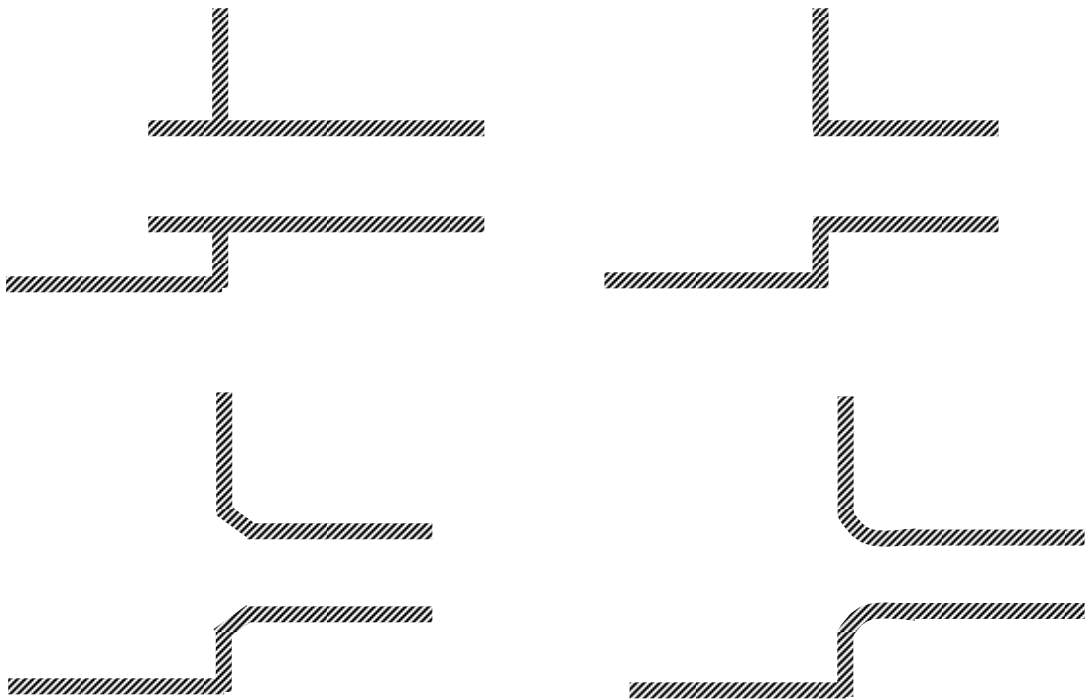


การสูญเสียพลังงานสำหรับการไหลของของเหลวจากหน้าตัดการไหลที่มีการลดหน้าตัดการไหลแบบค่อย ๆ เป็นค่อย ๆ ไป หาได้จากสมการ ดังนี้

5.7.6 การสูญเสียที่ทางเข้า

การสูญเสียพลังงานที่ทางเข้า หาได้จากสมการ ดังนี้

เมื่อ v_2 = ความเร็วเฉลี่ยของการไหล



5.7.7 การสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ท่อ

อุปกรณ์ท่อ หมายถึงส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งระบบท่อ เช่น ข้อต่อต่าง ๆ ข้ออวาล์ชนิดต่าง ๆ และประตูน้ำ เป็นต้น อุปกรณ์ท่อเหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของการไหล ดังนั้น การสูญเสียพลังงานเนื่องจากอุปกรณ์ท่อ หาได้จากสมการต่อไปนี้

เมื่อ v = ความเร็วในท่อ ซึ่งมีขนาดเท่ากับอุปกรณ์นั้น ๆ

การสูญเสียรอง อาจจะอยู่ในรูปของความยาวท่อสมมูล (Equivalent length; Le) ของท่อขนาดต่าง ๆ ความยาวท่อสมมูล คือ ความยาวของท่อ ซึ่งมีการสูญเสียพลังงานเท่ากับการสูญเสียรองต่าง ๆ หรือการสูญเสียหลัก นั่นคือ

$$f \cdot \frac{Le}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = K \frac{v^2}{2g}$$

$$Le = \frac{KD}{f}$$

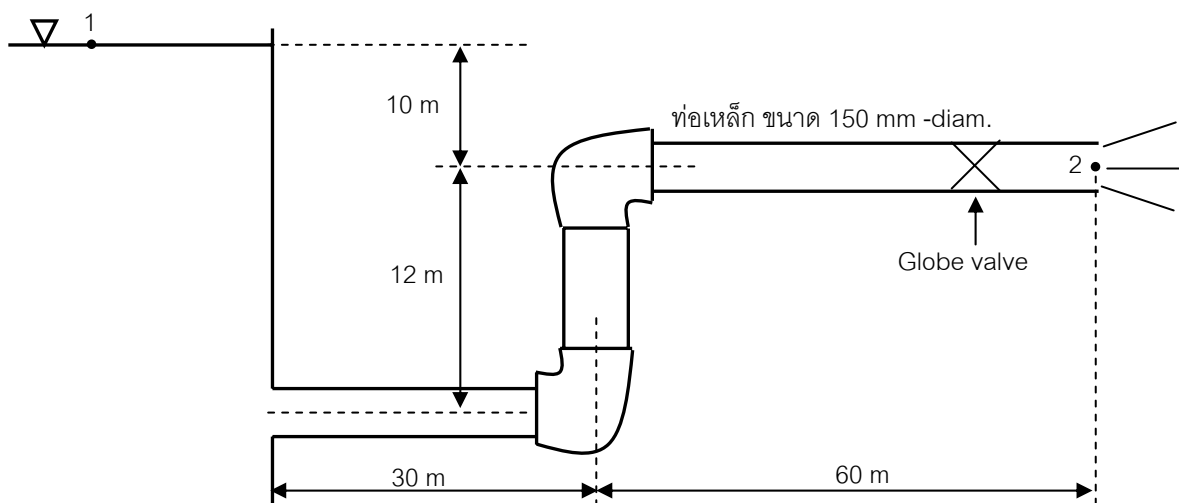
เมื่อ Le = ความยาวสมมูลของท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D

K = สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากอุปกรณ์เพียงอย่างเดียวหรือหลาย ๆ อย่างรวมกัน

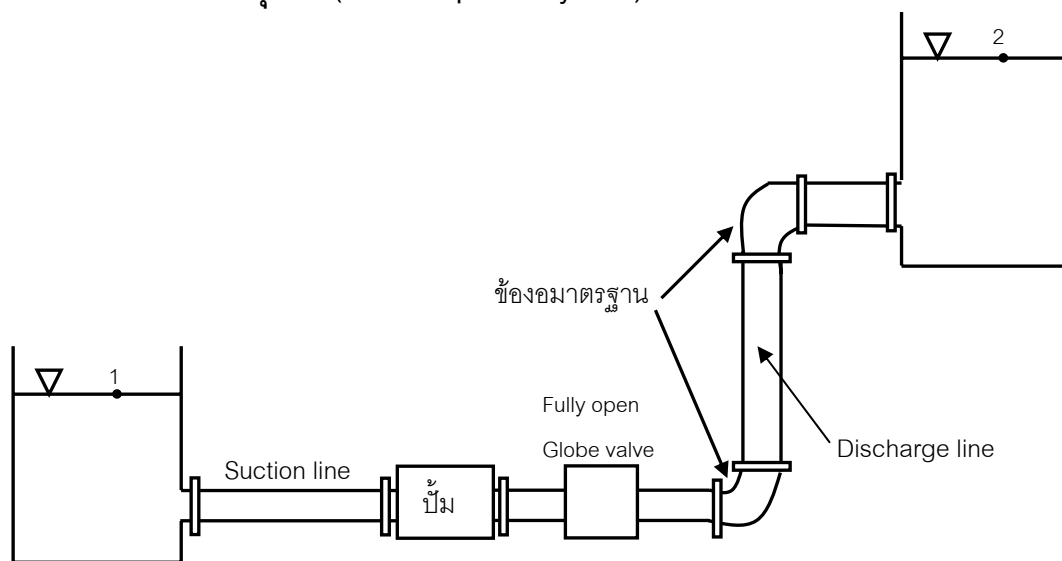
f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ

ตัวอย่างเช่น การสูญเสียรองในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 cm มีค่า K รวมกันได้เท่ากับ 20 และท่อมีค่า f เท่ากับ 0.02 จะได้ความยาวสมมูลของท่อเท่ากับ $\frac{20 \times 0.30}{0.02} = 300$ m ซึ่งความยาวท่อส่วนนี้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของการไหลเท่ากับการสูญเสียรองทั้งหมด

ตัวอย่าง 5.13 จากรูป จงคำนวณหาอัตราการไหล การสูญเสียพลังงาน และความยาวท่อสมมูลแทนการสูญเสียรอง เมื่อน้ำที่ 20°C ไหลด้วยอัตราการไหล 60 L/s กำหนดให้ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (K) ตรงทางเข้าท่อ ข้อต่อมาตรฐาน และ globe valve เท่ากับ 0.5, 0.9 และ 10 ตามลำดับ, $\epsilon = 0.25$ mm และความหนืด เท่ากับ 1.01×10^{-6} m²/s



5.8 การต่อท่อแบบอนุกรม (Series Pipeline System)



จากรูปข้างบน สมการพลังงาน แสดงได้ดังนี้

เมื่อ h_A = พลังงานที่ได้รับเพิ่มขึ้นจากปั๊ม (Total head on the pump)

h_L = พลังงานที่สูญเสียไปจากระบบ ณ จุดที่ 1 ถึงจุดที่ 2

เมื่อ h_1 = การสูญเสียที่ทางเข้า

h_2 = การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ณ suction line

h_3 = การสูญเสียที่วาล์ว

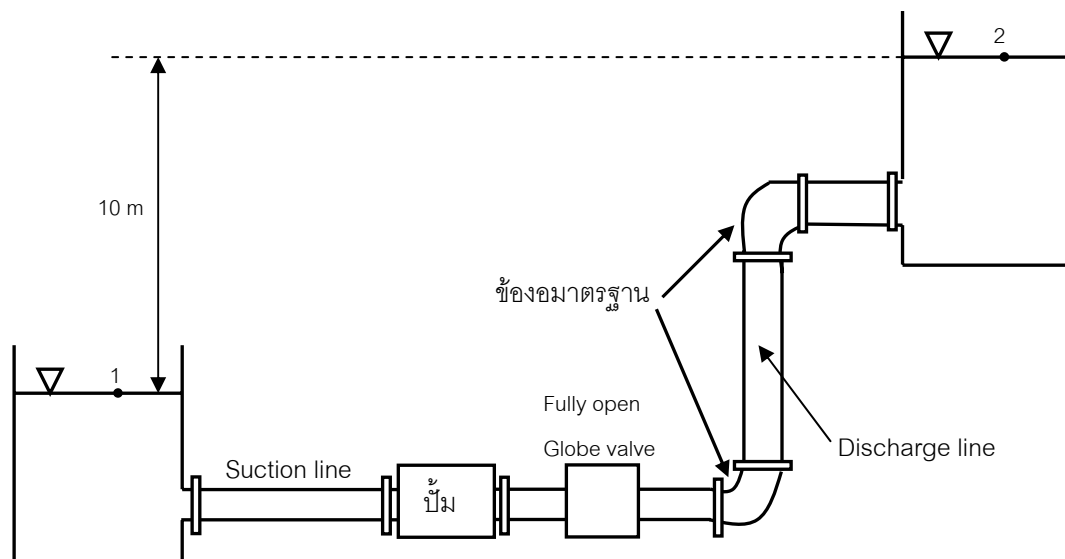
h_4 = การสูญเสียที่ข้อต่อทั้งสอง

h_5 = การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ณ discharge line

h_6 = การสูญเสียที่ทางออก

สำหรับการต่อท่อแบบอนุกรม การสูญเสียพลังงานทั้งหมด คือ ผลรวมของการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานทั้งหมด (การสูญเสียหลัก) กับ การสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ทั้งหมด (การสูญเสียรอง)

ตัวอย่าง 5.14 จากรูป จงคำนวณหาพลังงานที่ปั๊มจะต้องให้กับระบบ เมื่อประสิทธิภาพของปั๊มคือ 76% เพื่อที่จะส่งให้เมทิลแอลกอฮอล์ที่ 25°C ไหลด้วยอัตราการไหล $54.0 \text{ m}^3/\text{h}$



เมื่อ เมทิลแอลกอฮอล์ที่ 25°C : $\rho = 789 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 5.60 \times 10^{-4} \text{ Pa-s}$, $\gamma = 7.74 \text{ kN/m}^3$

Suction line: $D_s = 0.1023 \text{ m}$, $A_s = 8.213 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $L_s = 15 \text{ m}$, $\varepsilon = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$

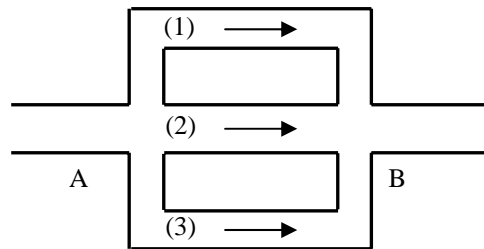
Discharge line: $D_d = 0.0525 \text{ m}$, $A_d = 2.168 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $L_d = 200 \text{ m}$, $\varepsilon = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$

Fully open globe valve; $\frac{L_e}{D} = 340$, $f = 0.019$

ข้อต่อมาตรฐาน; $\frac{L_e}{D} = 30$, $f = 0.019$

$K_{\text{ทางเข้า}} = 0.5$, $K_{\text{ทางออก}} = 1.0$

5.9 การต่อท่อแบบขนาน (Parallel Pipeline System)



เมื่อระบบท่อเป็นการต่อแบบขนาน ดังรูป สมการสภาพต่อเนื่องและสมการพลังงานที่ใช้ จะอยู่ภายใต้เงื่อนไข ดังต่อไปนี้

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \text{ และ } h_{L(A \rightarrow B)} = h_{L1} = h_{L2} = h_{L3}$$

ถ้าโจทย์ได้กำหนดอัตราการไหลรวม Q มาให้ และต้องการหาคำนวนหาอัตราการไหลในท่อแต่ละสายและการสูญเสียพลังงานหรือการสูญเสียเฮด จะสามารถหาค่าดังกล่าวได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) สมมุติอัตราการไหลในท่อสายที่ 1 เป็น Q_1

$$2) \text{ คำนวนหาค่า } h_{f1} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = \frac{8fL_1}{g\pi^2 D^5} \cdot Q_1^2$$

3) หาค่า Q_2 และ Q_3 จาก $h_{L1} = h_{L2} = h_{L3}$ จากสมการในข้อ (2)

$$4) \text{ ปรับค่า } Q_1, Q_2 \text{ และ } Q_3 \text{ จาก } Q_1 = \frac{Q_1 Q}{\sum Q}, Q_2 = \frac{Q_2 Q}{\sum Q}, Q_3 = \frac{Q_3 Q}{\sum Q} \text{ เมื่อ } Q = \text{อัตรา}$$

การไหลรวม และ $\sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

5) คำนวนค่า h_{f1}, h_{f2}, h_{f3} จากสมการในข้อ (2) โดยใช้ Q_1, Q_2 และ Q_3 จากสมการในข้อ (4)

6) ตรวจสอบว่า $h_{f1} = h_{f2} = h_{f3}$ หรือไม่ ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปจะมีค่าใกล้เคียงกัน ถ้าหากแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยก็ขอให้ปรับค่า f แล้วทำการคำนวณใหม่จะได้ค่า h_f ที่เท่ากันภายในการคำนวณครั้งที่สอง

ตัวอย่าง 5.15 จากรูป ระบบท่อ 3 สายต่อระหว่างจุด A และ B แบบขนานกัน

กำหนดให้ $L_1 = 3000$ ft, $D_1 = 1$ ft, $\varepsilon_1 = 0.001$ ft

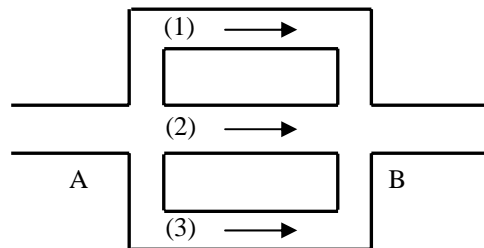
$L_2 = 2000$ ft, $D_2 = 8$ in, $\varepsilon_2 = 0.0001$ ft

$L_3 = 4000$ ft, $D_3 = 16$ in, $\varepsilon_3 = 0.0008$ ft

$\rho = 2.00$ slug/ft³, $\nu = 0.00003$ ft²/s, $P_A = 80$ psi, $z_A = 100$ ft, $z_B = 80$ ft, อัตราการ

ไหลรวม $Q = 12$ cfs

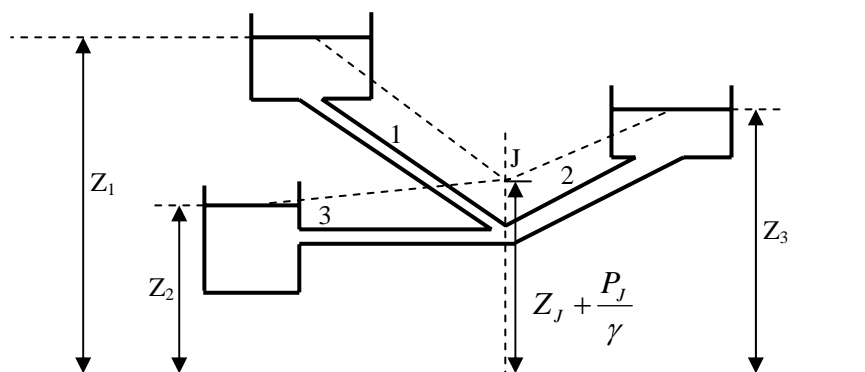
จงคำนวณหาอัตราการไหลในท่อแต่ละสาย และความดันที่จุด B



5.10 ระบบท่อแขนง (Branching Pipe)

ระบบท่อแขนงอย่างง่ายที่ต่อระหว่างอ่างเก็บน้ำ 3 แห่ง ดังรูป โดยในกรณีนี้โจทย์มักจะต้องการให้คำนวณหาค่าอัตราการไหลและทิศทางการไหลในแต่ละท่อ

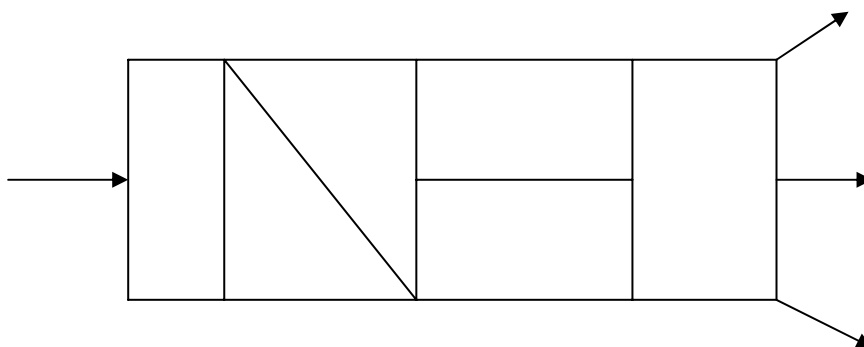
จากรูป สมการการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานสำหรับแต่ละท่อจะต้องสอดคล้องกับสมการสภาพต่อเนื่อง กล่าวคือ อัตราการไหลเข้าสู่จุดรวม J จะต้องเท่ากับอัตราการไหลออกจากจุดรวมนั้น ทั้งนี้ของเหลวจะไหลจากอ่างที่สูงที่สุดไปยังอ่างที่ต่ำที่สุด ดังนั้นสมการสภาพต่อเนื่องอาจจะเป็น $Q_1 = Q_2 + Q_3$ หรือ $Q_1 + Q_2 = Q_3$



5.11 ระบบท่อเครือข่าย (Pipe Network)

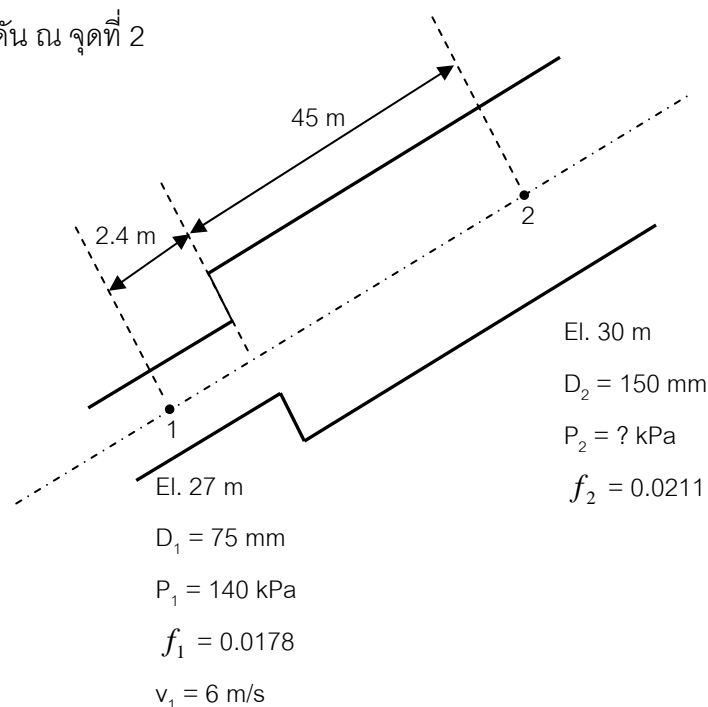
ระบบท่อเครือข่าย หมายถึง ระบบท่อที่ประกอบไปด้วยท่อหลาย ๆ สายเชื่อมโยงกัน โดยสามารถจ่ายน้ำออกจากหลาย ๆ วงจรของท่อ ซึ่งมีลักษณะคล้าย ๆ กับวงจรไฟฟ้า โจทย์ปัญหาส่วนใหญ่จะมีความซับซ้อนมากจะต้องใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบการลองผิดลองถูก ในระบบท่อเครือข่าย โดยทั่ว ๆ ไป จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ผลรวมทางพีชคณิตของการสูญเสียความดันภายในวงจรปิดใด ๆ จะต้องเท่ากับศูนย์
- 2) การไหลเข้าที่จุดรวมใด ๆ จะต้องเท่ากับการไหลออกจากจุดรวมนั้น
- 3) ในท่อสายใด ๆ จะต้องเป็นไปตามสมการของ Darcy-Weisbach

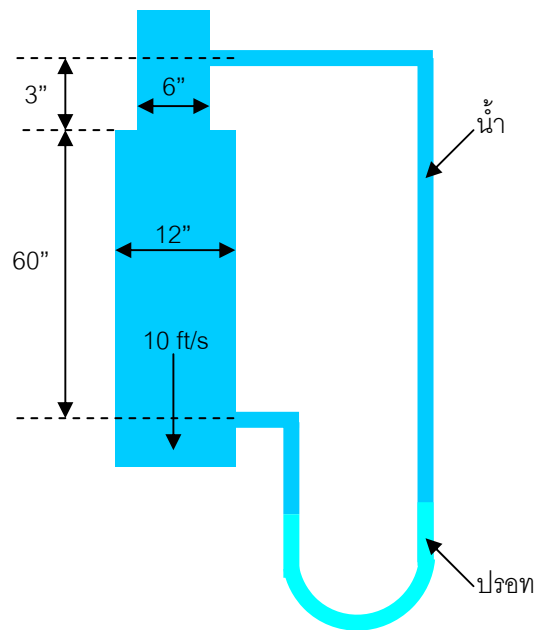


แบบฝึกหัดท้ายบท

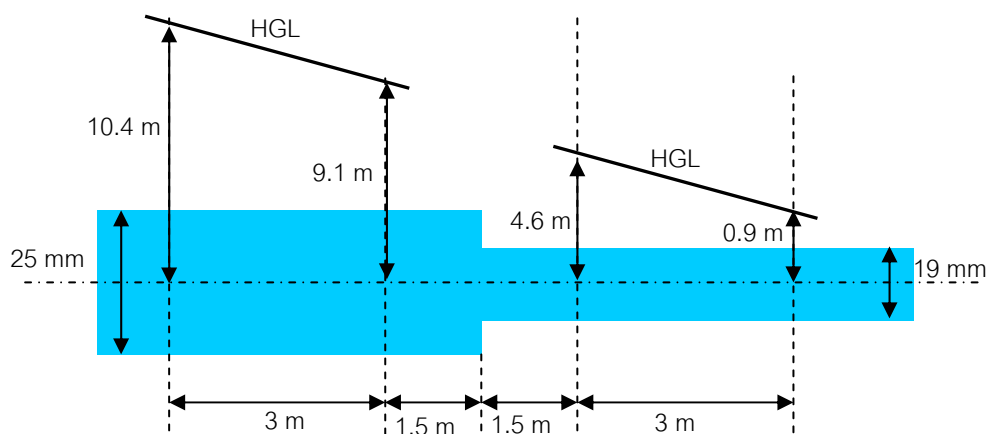
1. ท่อลำเลียงน้ำด้วยอัตราการไหล $20 \text{ ft}^3/\text{s}$ ระหว่างอ่างเก็บน้ำสองแห่งที่อยู่ห่างกัน 5 mi และมีระดับความสูงที่แตกต่างกัน 200 ft เมื่อพิจารณาเฉพาะการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียด โดยใช้สมการของ Darcy และสมการของ Hazen-Williams เพื่อหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อที่จะต้องเลือกใช้ กำหนดให้ $\epsilon = 0.00015 \text{ ft}$ และ $\nu = 1.2 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}$
2. จงคำนวณหาการสูญเสียพลังงาน, สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) และความขรุขระ (ϵ) ด้วยสมการของ Hazen-Williams สำหรับท่อเหล็กใหม่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 in ลำเลียงน้ำด้วยอัตราการไหล 2.5 cfs , ท่อยาว 1000 ft และ $C_h = 110$
3. ท่อเหล็กใหม่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 in ยาว 1000 ft ลำเลียงน้ำจาก El. 150 ขึ้นไปยัง El. 200 ถ้าความดันที่ El. 150 และ 200 เท่ากับ 100 psi และ 72 psi ตามลำดับ จงคำนวณหาอัตราการไหลตลอดทั้งความยาวท่อ เมื่อ $C_h = 110$
4. จงคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อที่ต้องใช้เพื่อลำเลียงด้วยอัตราการไหล 50 cfs จากอ่างเก็บน้ำสองแห่งที่ระดับผิวน้ำ El. 200 ไปยัง El. 100 และอยู่ห่างกัน 2 mile เมื่อ $C_h = 110$
5. จงคำนวณหา C_h เมื่อการสูญเสียพลังงานจากสมการของ Darcy และสมการของ Hazen-Williams มีค่าเท่ากัน คือ 2 in และ Reynolds number $= 10^5$
6. น้ำไหลจากท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ด้วยอัตราการไหล $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ ไปยังท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 mm วางอยู่ในแนวระดับ เมื่อความดันที่ท่อขนาด 150 mm เท่ากับ 138 kPa จงคำนวณหาความดันที่ท่อขนาด 300 mm เมื่อไม่คิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานจากท่อ
7. เมื่อของไหลมีความถ่วงจำเพาะ 0.90 , Reynolds number $= 10^5$ ไหลในท่อ ดังรูป จงคำนวณหาความดัน ณ จุดที่ 2



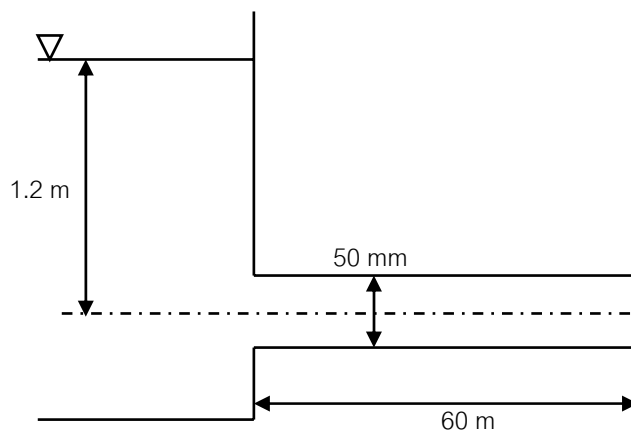
8. จากรูป เมื่อน้ำไหลในท่อดังรูป จงคำนวณหาว่าปรอทในमानometerจะอ่านค่าได้เท่าใด และมีทิศทางการเคลื่อนที่อย่างไร



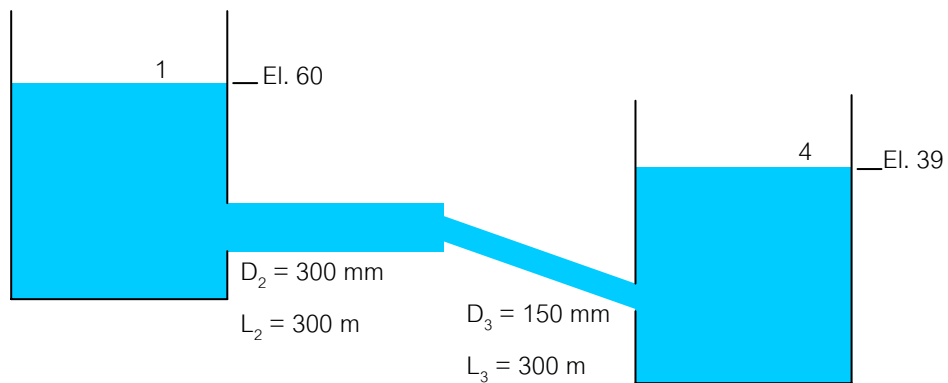
9. จากรูป เมื่อ อัตราการไหลเท่ากับ $0.0014 \text{ m}^3/\text{s}$ จงคำนวณหา ค่าการสูญเสียพลังงานและค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบทันทีทันใด



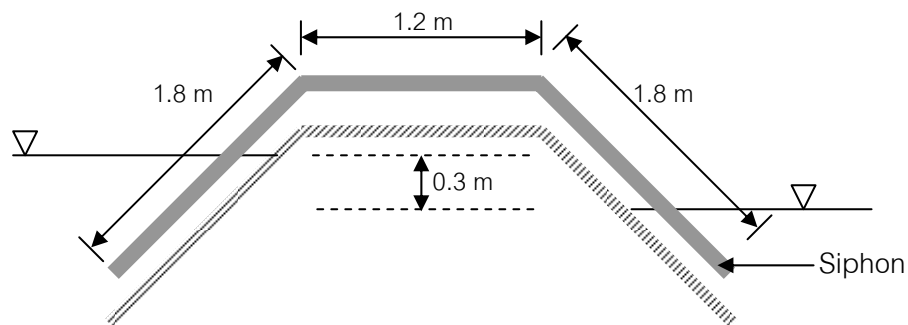
10. จากรูป จงคำนวณหาอัตราการไหลสำหรับน้ำที่อุณหภูมิ 10°C ($\gamma = 1.306 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)



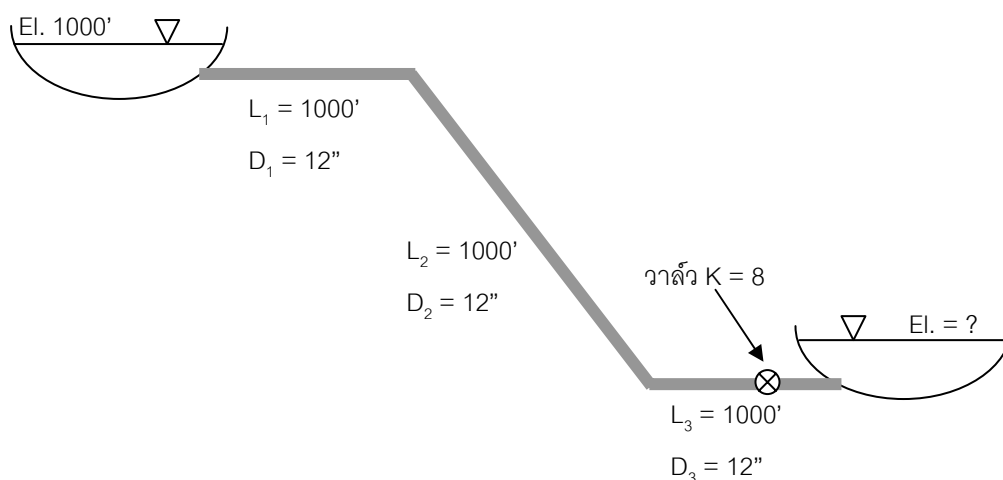
11. จากรูป เมื่อ $f = 0.02$ จงคำนวณหาอัตราการไหล เมื่อไม่คิดการสูญเสียรอง



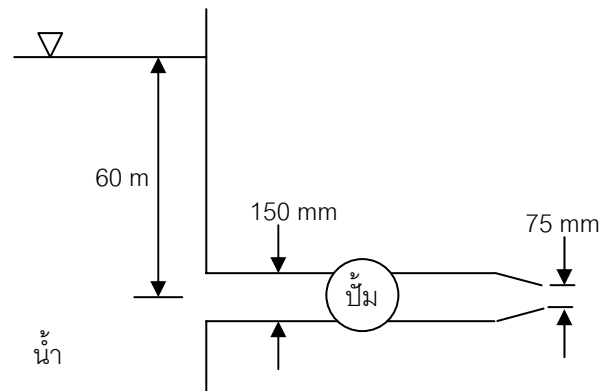
12. ระบบกาลักน้ำ (Siphon) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm ดังรูป จงคำนวณหาอัตราการไหล เมื่อ $K_{\text{ทางเข้า}} = 0.8$, $K_{\text{ทางออก}} = 1.0$, $K_{\text{ข้อต่อ}} = 0.2$ และ $f = 0.02$



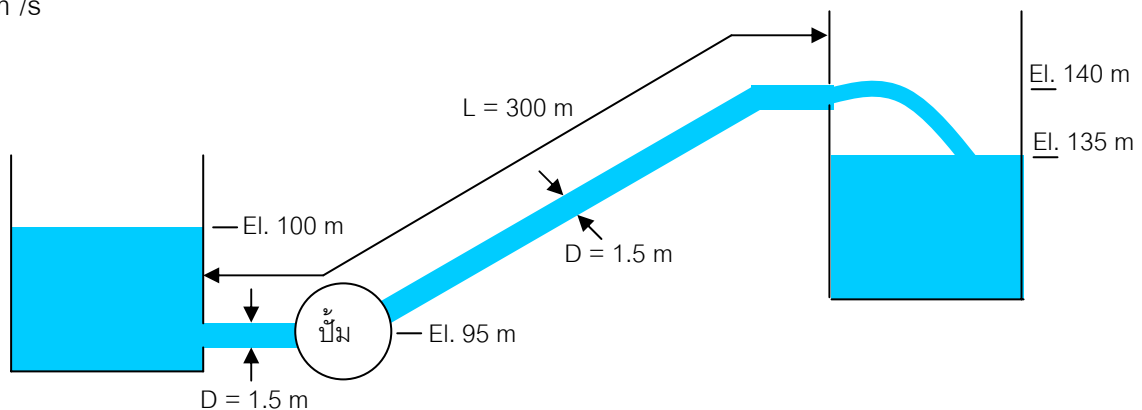
13. ท่อคอนกรีต ($\epsilon = 0.12$ in) ยาว 3000 ft ลำเลียงน้ำ (ความหนืด $= 1.1 \times 10^{-5}$ ft²/s) ระหว่างอ่างเก็บน้ำสองแห่งถ้าอัตราการไหลเท่ากับ 4.0 cfs จงคำนวณหาความดันของผิวน้ำของอ่างเก็บน้ำที่อยู่ต่ำกว่า เมื่อคิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ($f = 0.038$) และจากวาล์วเท่านั้น



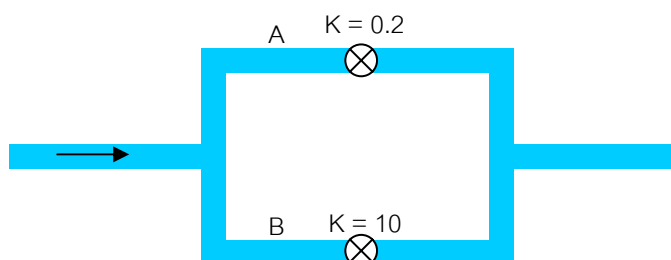
14. จากรูป เมื่อปั๊มไม่ทำงานจะมีอัตราการไหลเท่ากับ $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ จงคำนวณหา กำลังงานของปั๊มที่จะต้องทำให้มีอัตราการไหลเท่ากับ $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$



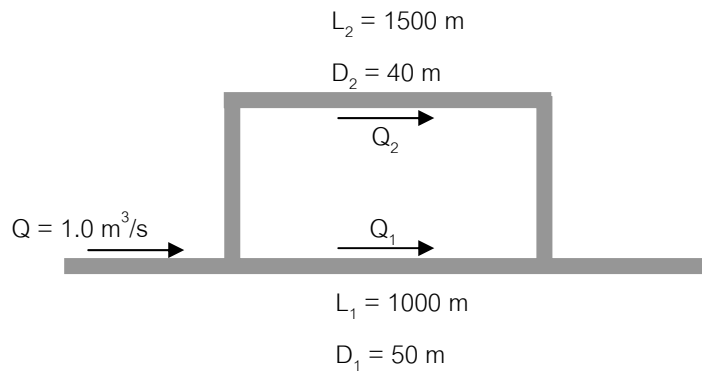
15. น้ำถูกสูบด้วยอัตรา $15 \text{ m}^3/\text{s}$ จากอ่างเก็บน้ำ ด้วยท่อขนาด 1.5 m จงคำนวณหา กำลังที่ปั๊มจะต้องใช้ กำหนดให้ $K_{รวม} = 0.03$, $f = 0.0105$, $\frac{\epsilon}{D} = 0.000035$ และความหนืด $= 1.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



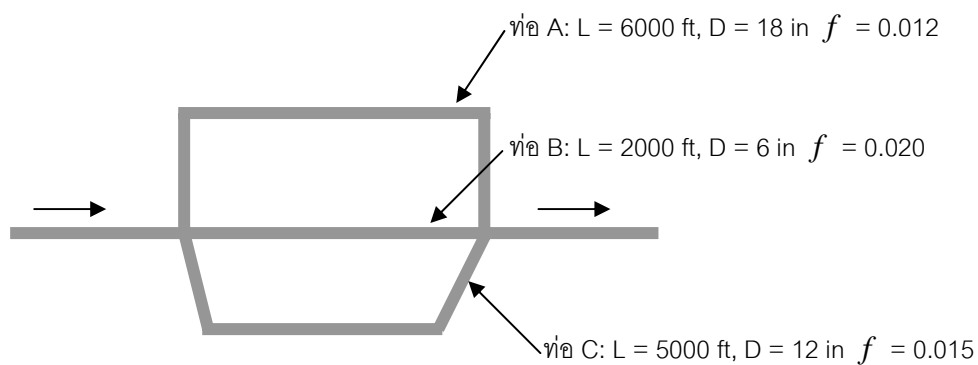
16. จากรูป เมื่อหน้าตัดการไหลของท่อ A เป็น $\frac{1}{4}$ ของหน้าตัดการไหลของท่อ B และคิดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากวาล์วทั้งสองตัวนี้เท่านั้น จงคำนวณหา อัตราส่วนของอัตราการไหลในท่อ B ต่от่อ A



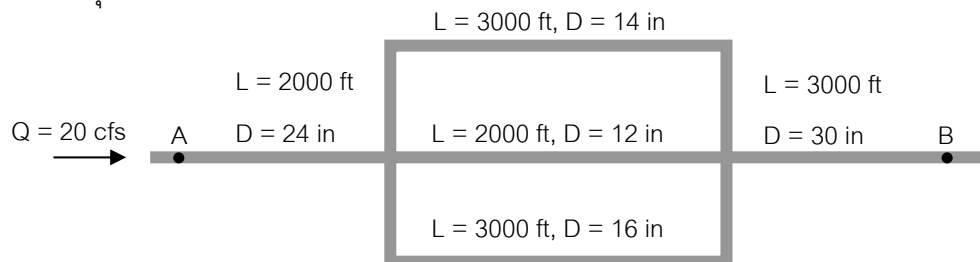
17. จากระบบ จงคำนวณหาอัตราการไหลในท่อแต่ละเส้น



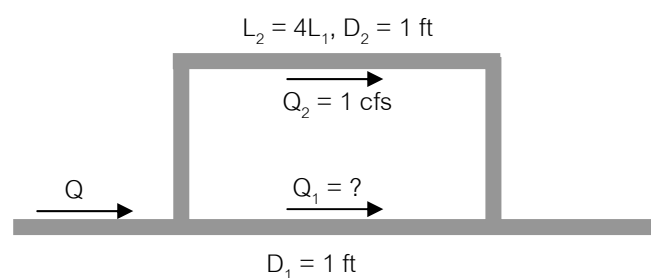
18. จากระบบ จงคำนวณว่า ท่อ A, B หรือ C ที่มีความเร็วของไหลสูงสุด

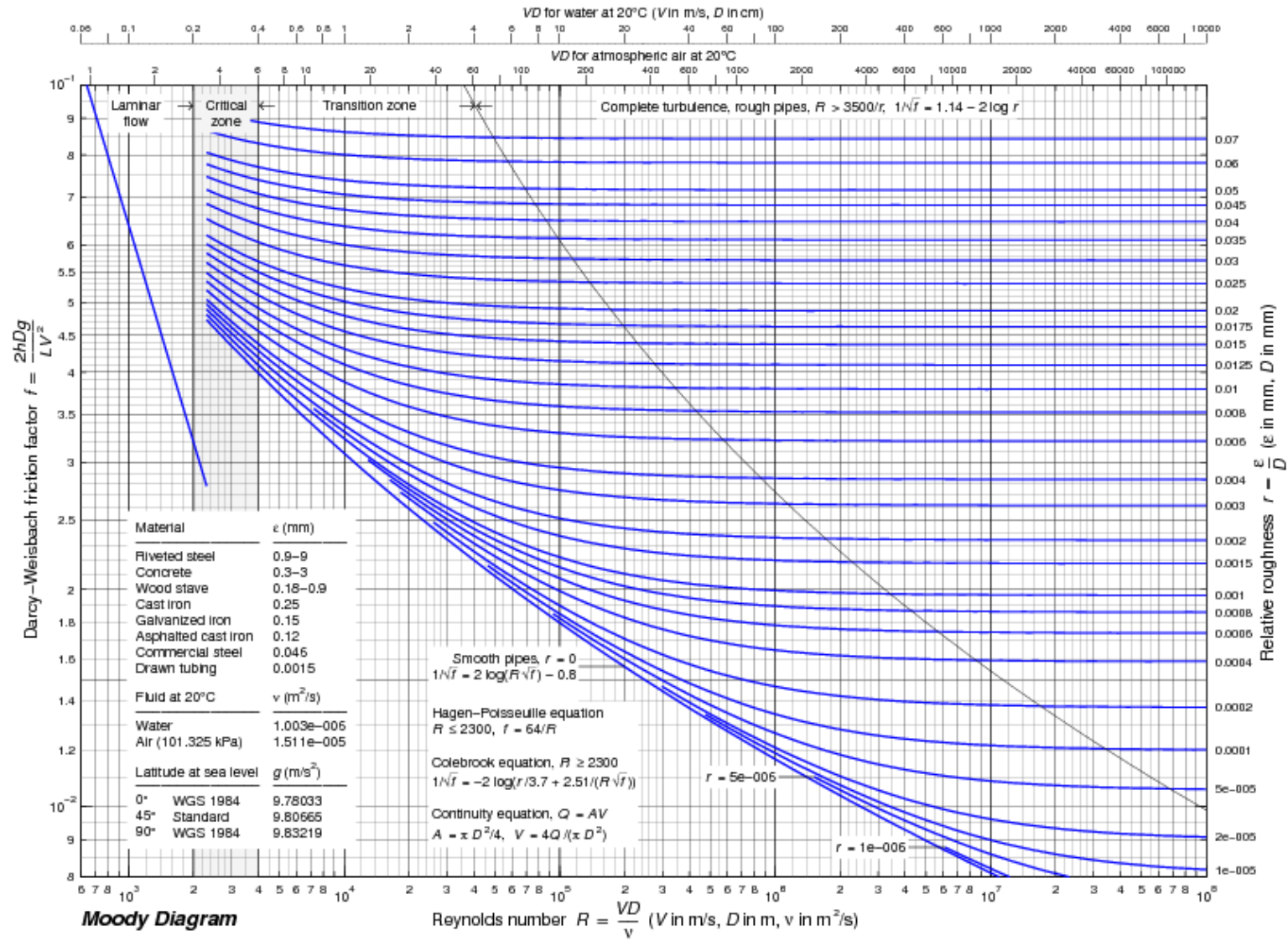


19. จากระบบ เป็นท่อคอนกรีต ซึ่งท่อทุกเส้นมี $f = 0.030$ จงคำนวณหาการสูญเสียพลังงานจากจุด A ไปยังจุด B

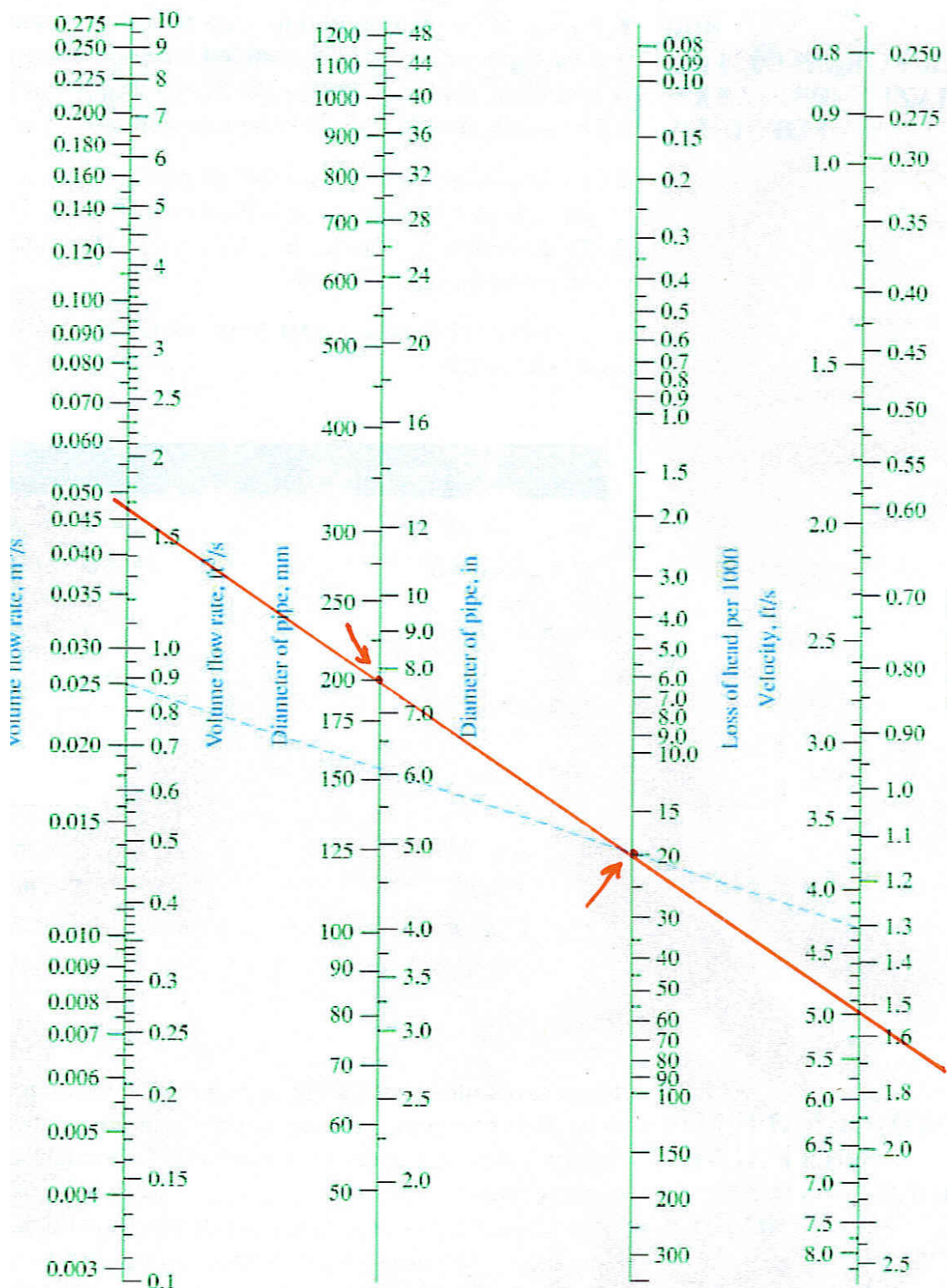


20. จากระบบ เมื่อ f ของท่อทั้งสองเส้นนี้เท่ากัน จงคำนวณหาอัตราการไหลในท่อที่ 1 (Q_1)





Nomogram Hazen-Williams met Ch = 100



(http://blogsimages.skynet.be/images_v2/002/634/315/20080522/dyn009_original_1140_1626_pjpeg_2634315_337e268a8854079b54630ff2f2ca5740.jpg)

คำตอบ

1. สมการของ Darcy: $d = 1.78 \text{ ft} = 21.4 \text{ in}$
สมการของ Hazen-Williams: $d = 1.82 \text{ ft} = 21.8 \text{ in}$
2. $h_L = 4.3 \text{ ft}$, $f = 0.027$, $\varepsilon = 0.0035$
3. $Q = 11.3 \text{ ft}^3/\text{s}$
4. $d = 2.4 \text{ ft} = 28 \text{ in}$
5. $C_h = 155$
6. $P_{300} = 150 \text{ kPa}$
7. $P_{150} = 103.9 \text{ kPa}$
8. อ่านค่าได้ = 9.32 ft ของน้ำ = 8.9 in ของปรอท มีทิศทางลงด้านซ้ายและขึ้นด้านขวา
9. $h_L = 1.18 \text{ m}$, $K_L = 0.95$
10. $Q = 1.82 \text{ L/s}$
11. $Q = 0.056 \text{ m}^3/\text{s}$
12. $Q = 0.0114 \text{ m}^3/\text{s}$
13. ระดับของผิวน้ำของอ่างเก็บน้ำที่อยู่ต่ำกว่า = 951 ft
14. Power = 70.9 kW
15. Power = 7.58 MW
16. อัตราส่วนของอัตราการไหลในท่อ B ต่อดท่อ A = 0.566
17. $Q_1 = 0.68 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $Q_2 = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$
18. V_A มากที่สุด
19. $h_L = 68.3 \text{ ft}$
20. $Q_1 = 2 \text{ cfs}$