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

วิธีทำ

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{100\ \frac{L}{min}}{5.017 \times 10^{-4}\ m^2} \times \frac{1\ \frac{m^3}{s}}{60{,}000\ \frac{L}{min}} = 3.32\ m/s$$

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{\left(3.32\ \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9.81\ \frac{m}{s^2}} = 0.56\ m$$

$$h_L = K\left(\frac{v_1^2}{2g}\right) = (0.72)(0.56\ m) = 0.40\ m$$ ตอบ

ตัวอย่าง 5.12 จากข้อมูลในตัวอย่างที่ 5.10 จงคำนวณหาความแตกต่างของความดันระหว่างท่อขนาดเล็กกับท่อขนาดใหญ่กว่า

วิธีทำ

จาก $\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L$

$$P_1 - P_2 = \gamma\left[(z_2 - z_1) + \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}\right) + h_L\right]$$

$z_2 - z_1 = 0$ เพราะอยู่ที่ระดับความสูงเดียวกัน

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{100\ \frac{L}{min}}{4.282 \times 10^{-3}\ m^2} \times \frac{1\ \frac{m^3}{s}}{60{,}000\ \frac{L}{min}} = 0.39\ m/s$$

$$P_1 - P_2 = \left(9.81\ \frac{kN}{m^3}\right)\left[\frac{\left(0.39\ \frac{m}{s}\right)^2 - \left(3.32\ \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9.81\ \frac{m}{s^2}} + 0.40\right] = -1.51\ \frac{kN}{m^2}$$

$P_1 - P_2 = -1.51\ kPa$ ตอบ

5.6.2 การสูญเสียที่ทางออก

เมื่อของไหลไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่หรือถังน้ำขนาดใหญ่ ดังภาพ ความเร็วของการไหลที่เข้าสู่อ่างนั้นจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ พลังงานที่สูญเสียที่ทางออกจากท่อ หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$h_L = K\left(\frac{v_1^2}{2g}\right)$$

เมื่อ h_L คือ การสูญเสียรองที่ทางออก

$K = 1.0$

5.6.3 การขยายหน้าตัดการไหลอย่างค่อย ๆ เป็นค่อย ๆ ไป

การสูญเสียพลังงานสำหรับการไหลของของเหลวจากหน้าตัดการไหลที่เล็กกว่าไปยังหน้าตัดการไหลที่ใหญ่กว่า หาได้จากสมการ ดังนี้

$$h_L = K\left(\frac{v_1^2}{2g}\right)$$

5.6.4 การลดขนาดหน้าตัดการไหลอย่างทันทีทันใด

การสูญเสียพลังงานสำหรับการไหลของของเหลวจากหน้าตัดการไหลที่มีการลดหน้าตัดการไหลอย่างทันทีทันใด หาได้จากสมการ ดังนี้

$$h_L = K\left(\frac{v_1^2}{2g}\right)$$

5.6.5 การลดขนาดหน้าตัดการไหลอย่างค่อย ๆ เป็น ค่อย ๆ ไป

การสูญเสียพลังงานสำหรับการไหลของของเหลวจากหน้าตัดการไหลที่มีการลดหน้าตัดการไหลแบบค่อย ๆ เป็นค่อย ๆ ไป หาได้จากสมการ ดังนี้

$$h_L = K\left(\frac{v_1^2}{2g}\right)$$

5.6.6 การสูญเสียที่ทางเข้า

การสูญเสียพลังงานที่ทางเข้า หาได้จากสมการ ดังนี้

$$h_L = K\left(\frac{v_2^2}{2g}\right)$$

เมื่อ v_2 คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหลที่ไหลเข้า

5.6.7 การสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ท่อ

อุปกรณ์ท่อ หมายถึง ส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งระบบท่อ เช่น ข้อต่อต่าง ๆ ข้องอ วาล์วชนิดต่าง ๆ และประตูน้ำ เป็นต้น อุปกรณ์ท่อเหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของการไหล ดังนั้น การสูญเสียพลังงานเนื่องจากอุปกรณ์ท่อ หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$h_L = K\left(\frac{v_p^2}{2g}\right) \tag{5.8}$$

เมื่อ v_p คือ ความเร็วในท่อ ซึ่งมีขนาดเท่ากับอุปกรณ์นั้น ๆ

นอกจากนี้ การสูญเสียรองสามารถระบุในรูปของความยาวท่อสมมูลย์ (Equivalent length; Le) ของท่อขนาดต่าง ๆ

ความยาวท่อสมมูลย์ คือ ความยาวของท่อ ซึ่งมีการสูญเสียพลังงานเท่ากับการสูญเสียรองต่าง ๆ หรือการสูญเสียหลัก นั้นคือ

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

$$Le = \frac{KD}{f} \tag{5.9}$$

เมื่อ Le คือ ความยาวสมมูลย์ของท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D

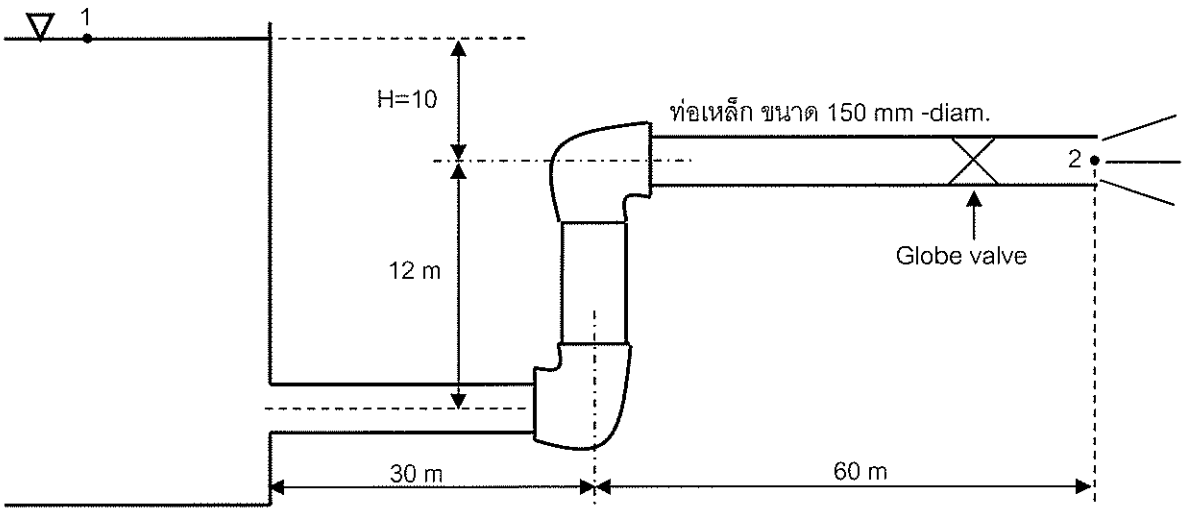
K คือ ประสิทธิ์การสูญเสียจากอุปกรณ์เพียงอย่างเดียวหรือหลาย ๆ อย่างรวมกัน

f คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ

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

ตัวอย่าง 5.13 จากภาพ จงคำนวณหาอัตราการไหลในท่อ พร้อมทั้งคำนวณหา การสูญเสียพลังงาน และความยาวท่อสมมูลย์แทนการสูญเสียรอง เมื่อน้ำที่ 20°C ไหลด้วยอัตราการไหล 60 L/s

กำหนดให้ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย ตรงทางเข้าท่อ ข้องอมาตรฐาน และโกล์บอลวาล์วเท่ากับ 0.5, 0.9 และ 10 ตามลำดับ ความขรุขระเฉลี่ยของท่อเท่ากับ = 0.25 mm และความหนืดจลน์เท่ากับ $1.01 \times 10^{-6}\ m^2/s$



วิธีทำ

สมการพลังงานจาก 1 ไป 2 จะได้ $\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L$

จะได้ $z_1 - z_2 = \frac{v_2^2}{2g} + h_L$

แทนค่า $10\,m = \frac{v_2^2}{2g} + (0.5)\frac{v_2^2}{2g} + f \cdot \frac{102}{0.15} \cdot \frac{v_2^2}{2g} + (2 \times 0.9)\frac{v_2^2}{2g} + (10)\frac{v_2^2}{2g}$

$$10\,m = (13.3 + 680f)\frac{v_2^2}{2g} \qquad (1)$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.25 \times 10^{-3}\,m}{0.15\,m} = 0.017$$

สมมุติ $f = 0.023$

จากสมการที่ (1) จะได้ $v_2 = 2.60\,m/s$

ตรวจสอบ; $Re = \frac{vD}{\upsilon} = \frac{\left(2.6\frac{m}{s}\right)(0.15m)}{1.01\times10^{-6}\frac{m^2}{s}} = 3.86\times10^5$

จาก Moody Diagram เมื่อ $Re = 3.86\times10^5$ และ $\frac{\varepsilon}{D} = 0.017$ จะได้ $f = 0.023$ แสดงว่าค่า f ที่สมมุติขึ้นนั้นถูกต้องแล้ว ดังนั้น

$$Q = Av_2 = \left[\frac{\pi}{4}(0.15m)^2\right]\left(2.60\frac{m}{s}\right) = 0.046\frac{m^3}{s} = 46L/s$$ ตอบ

เมื่อ $Q = 60\frac{L}{s}$, H =?

$$v_2 = \frac{0.06\frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4}(0.15m)^2} = 3.40m/s$$

$$Re = \frac{vD}{\upsilon} = \frac{\left(3.4\frac{m}{s}\right)(0.15m)}{1.01\times10^{-6}\frac{m^2}{s}} = 5.04\times10^5$$

จาก Moody Diagram เมื่อ $Re = 5.05\times10^5$ และ $\frac{\varepsilon}{D} = 0.017$ จะได้ $f = 0.023$

จากสมการที่ (1) จะได้ $H = \left(13.3 + 680(0.023)\right)\left(\frac{\left(3.4\frac{m}{s}\right)^2}{2\times9.81\frac{m}{s^2}}\right) = 17.05m$ ตอบ

การคำนวณหาความยาวท่อสมมูลย์

$$Le = \frac{KD}{f} = \frac{\left(0.5 + (2\times0.9) + 10\right)(0.15\ m)}{0.023} = 80.22m$$ ตอบ

5.7 สมการของ Hazen-Williams (Hazen-Williams formula for water flow)

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

สมการของ Hazen-Williams ในหน่วยอังกฤษ คือ

$$v = 1.32 C_h R^{0.63} S^{0.54} \quad (5.10)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (ft/s)

C_h คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William (ไม่มีหน่วย) ขึ้นกับลักษณะของผิวท่อ ดังตารางที่ 5-1

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

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

สมการของ Hazen-Williams ในหน่วย SI คือ

$$v = 0.85 C_h R^{0.63} S^{0.54} \quad (5.11)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

C_h คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William (ไม่มีหน่วย) ดังตารางที่ 5-1

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

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

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William (C_h)

ชนิด	C_h	
	ค่าเฉลี่ยสำหรับท่อใหม่/ท่อสะอาด	ค่าออกแบบ
เหล็กเหนียว, เหล็กดัดตัวง่าย	150	140
พลาสติก, ทองแดง, ทองเหลือง, แก้ว	140	130
คอนกรีต	120	100
เหล็กลูกฟูก	60	60

ตัวอย่าง 5.10 จงคำนวณหาความเร็วเฉลี่ย และอัตราการไหลของน้ำที่ไหลในท่อเหล็กยาว 304.8 m ซึ่งมีการสูญเสียพลังงานเท่ากับ 6.1 m

กำหนดให้ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William (C_h) เท่ากับ 130 และท่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 15.4 cm

วิธีทำ

จาก $v = 0.85C_hR^{0.63}S^{0.54} = 0.85C_h\left(\frac{D}{4}\right)^{0.63}\left(\frac{h_L}{L}\right)^{0.54}$

$$v = (0.85)(130)\left(\frac{0.154\,m}{4}\right)^{0.63}\left(\frac{6.1m}{304.8\,m}\right)^{0.54} = 1.717\,m/s$$

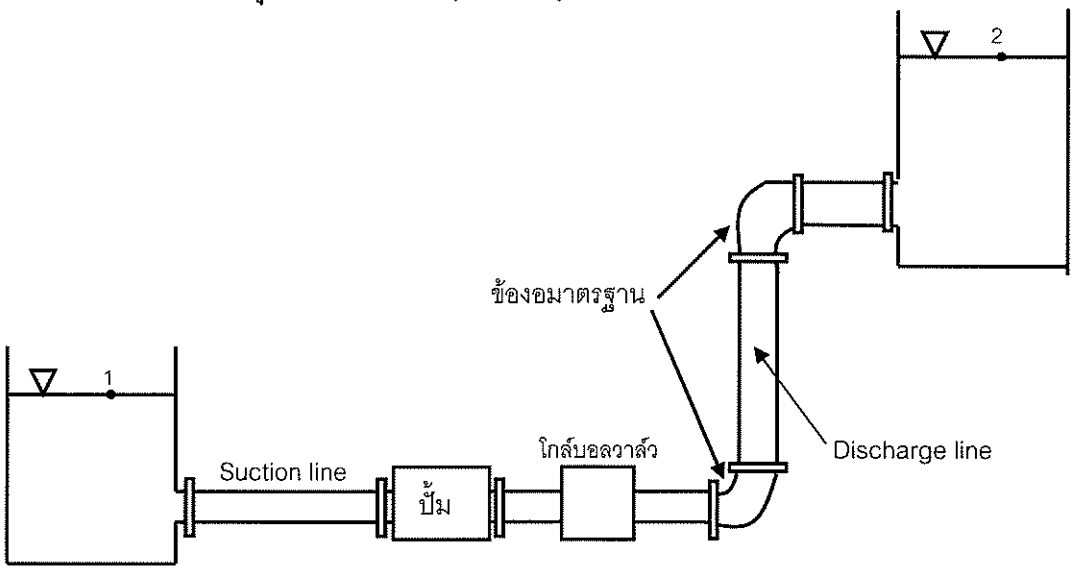
$$Q = Av = \left(\frac{\pi}{4}\times(0.154\,m)^2\right)\left(1.717\frac{m}{s}\right) = 0.033\,m^3/s$$ ตอบ

นอกจากนี้ ยังสามารถจัดรูปสมการของ Hazen-William ใหม่ได้ ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สมการของ Hazen-William ในรูปแบบต่าง ๆ

หน่วยอังกฤษ	หน่วย SI
$v = 1.32C_hR^{0.63}s^{0.54}$	$v = 0.85C_hR^{0.63}s^{0.54}$
$Q = 1.32AC_hR^{0.63}s^{0.54}$	$Q = 0.85AC_hR^{0.63}s^{0.54}$
$h_L = L\left[\frac{Q}{1.32AC_hR^{0.63}}\right]^{1.852}$	$h_L = L\left[\frac{Q}{0.85AC_hR^{0.63}}\right]^{1.852}$
$D = \left[\frac{2.31Q}{C_hs^{0.54}}\right]^{0.380}$	$D = \left[\frac{3.59Q}{C_hs^{0.54}}\right]^{0.380}$
เมื่อ	
v = ft/s Q = ft^3/s A = ft^2 h_L, L, R และ D = ft s = ft/ft (ไม่มีหน่วย)	v = m/s Q = m^3/s A = m^2 h_L, L, R และ D = m s = m/m (ไม่มีหน่วย)

5.8 การต่อท่อแบบอนุกรม (Series Pipeline System)



ภาพที่ 5.2 การต่อท่อแบบอนุกรม

จากภาพที่ 5.2 สมการพลังงาน แสดงได้ดังนี้

$$\frac{P_1}{\gamma}+z_1+\frac{v_1^2}{2g}+h_A-h_L=\frac{P_2}{\gamma}+z_2+\frac{v_2^2}{2g}$$

เมื่อ h_A คือ พลังงานที่ได้รับเพิ่มขึ้นจากปั๊ม

h_L คือ พลังงานที่สูญเสียไปจากระบบ ณ จุดที่ 1 ถึงจุดที่ 2

$h_L = h_1+h_2+h_3+h_4+h_5+h_6$

h_1 คือ การสูญเสียที่ทางเข้า

h_2 คือ การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ณ suction line

h_3 คือ การสูญเสียที่ Globe valve

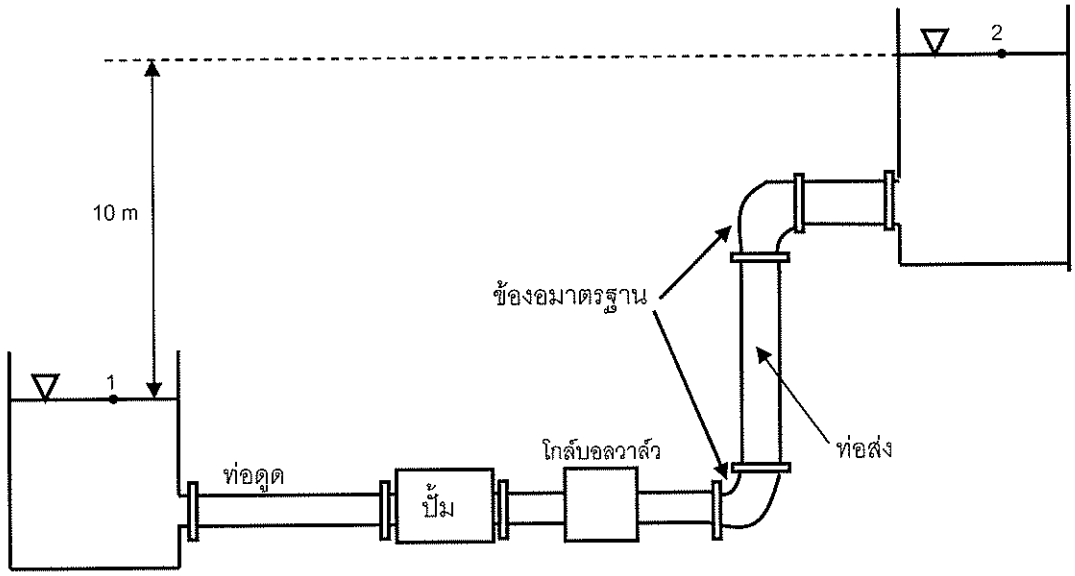
h_4 คือ การสูญเสียที่ข้องอทั้งสอง

h_5 คือ การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ณ discharge line

h_6 คือ การสูญเสียที่ทางออก

สำหรับการต่อท่อแบบอนุกรม การสูญเสียพลังงานทั้งหมด คือผลรวมของการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานทั้งหมด (การสูญเสียหลัก) กับการสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ทั้งหมด (การสูญเสียรอง)

ตัวอย่าง 5.14 จากภาพ จงคำนวณหาพลังงานที่ปั๊มจะต้องให้กับระบบ เมื่อประสิทธิภาพของปั๊มคือ 76% เพื่อที่จะส่งให้เมทิลแอลกอฮอล์ที่ 25°C ไหลด้วยอัตราการไหล 54.0 m^3/h



เมื่อ เมทิลแอลกอฮอล์ที่ 25°C: ρ = 789 kg/ m^3, μ = 5.60 x 10^{-4} Pa-s, γ = 7.74 kN/m^3

ท่อดูด: D_s = 0.1023 m, A_s = 8.213 x 10^{-3} m^2, L_s = 15 m, ε = 4.6 x 10^{-5} m

ท่อส่ง: D_s = 0.0525 m, A_d = 2.168 x 10^{-3} m^2, L_d = 200 m, ε = 4.6 x 10^{-5} m

โกล์บอลวาล์ว ; $\frac{L_e}{D}$ = 340, f = 0.019

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

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

วิธีทำ

จาก $\frac{P_1}{\gamma}+z_1+\frac{v_1^2}{2g}+h_A-h_L=\frac{P_2}{\gamma}+z_2+\frac{v_2^2}{2g}$

$z_1+h_A-h_L=z_2$

$h_A=z_2-z_1+h_L=10\,m+h_L$ (1)

$Q=54\frac{m^3}{hr}\times\frac{1hr}{3{,}600\,s}=0.015\,m^3/s$

$v_s=\frac{Q}{A_s}=\frac{0.015\frac{m^3}{s}}{8.213\times10^{-3}\,m^2}=1.83\,m/s;\quad \frac{v_2^2}{2g}=\frac{\left(1.83\frac{m}{s}\right)^2}{2\times9.81\frac{m}{s^2}}=0.17\,m$

$$v_d = \frac{Q}{A_d} = \frac{0.015\frac{m^3}{s}}{2.168\times10^{-3}\ m^2} = 6.92\,m/s;\quad \frac{v_2^2}{2g} = \frac{\left(6.92\frac{m}{s}\right)^2}{2\times9.81\frac{m}{s^2}} = 2.44\,m$$

ที่ท่อดูด

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{\left(1.83\frac{m}{s}\right)(0.1023\,m)\left(789\frac{kg}{m^3}\right)}{5.60\times10^{-4}\ Pa\cdot s} = 2.64\times10^5$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{4.6\times10^{-5}\,m}{0.1023\,m} = 0.00045$$

จาก Moody Diagram จะได้ $f = 0.018$

ที่ท่อส่ง

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{\left(6.92\frac{m}{s}\right)(0.0525\,m)\left(789\frac{kg}{m^3}\right)}{5.60\times10^{-4}\ Pa\cdot s} = 5.12\times10^5$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{4.6\times10^{-5}\,m}{0.0525\,m} = 0.0009$$

จาก Moody Diagram จะได้ $f = 0.020$

หา h_L ทั้งหมด

ที่ทางเข้า; $h_1 = 0.5\left(\frac{v_s^2}{2g}\right) = (0.5)(0.17\,m) = 0.09\,m$

ท่อดูด; $h_2 = f_s\cdot\frac{L}{D}\cdot\frac{v_s^2}{2g} = (0.018)\left(\frac{15\,m}{0.1023\,m}\right)(0.17\,m) = 0.45\,m$

โกล์บวาล์ว $h_3 = f_d\cdot\frac{Le}{D}\cdot\frac{v_d^2}{2g} = (0.019)(340\,m)(2.44\,m) = 15.76\,m$

ข้องอ 2 ตัว; $h_4 = 2f_d\cdot\frac{Le}{D}\cdot\frac{v_d^2}{2g} = 2(0.019)(30\,m)(2.44\,m) = 2.78\,m$

ท่อส่ง; $h_5 = f_d\cdot\frac{L}{D}\cdot\frac{v_d^2}{2g} = (0.020)\left(\frac{200\,m}{0.0525\,m}\right)(2.44\,m) = 185.9\,m$

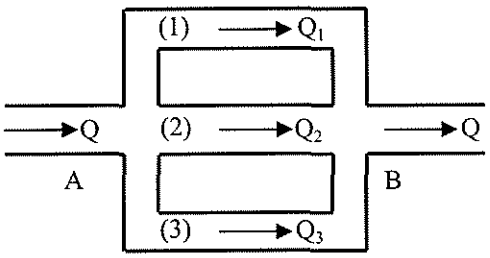
ทางออก; $h_6 = 1.0\left(\frac{v_d^2}{2g}\right) = (1.0)(2.44\,m) = 2.44\,m$

$\therefore h_L = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 = 207.4\,m$

จากสมการที่ (1); $h_A = 10\,m + 207.4\,m = 217.4\,m$

$$P = \frac{h_A \gamma Q}{e_m} = \frac{(217.4\,m)\left(7.74\frac{kN}{m^3}\right)\left(0.015\frac{m^3}{s}\right)}{0.76} = 33.2\times10^3\ N\cdot m/s = 33.2\,kW$$ ตอบ

5.9 การต่อท่อแบบขนาน (Parallel Pipeline System)



เมื่อระบบท่อเป็นการต่อแบบขนาน สมการสภาพต่อเนื่องและสมการพลังงานที่ใช้ จะอยู่ภายใต้เงื่อนไข ดังต่อไปนี้

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \text{ และ } h_{L(A\rightarrow B)} = h_{L1} = h_{L2} = h_{L3} \qquad (5.12)$$

ถ้าโจทย์ได้กำหนดอัตราการไหลรวม Q มาให้ และต้องการให้คำนวณหาอัตราการไหลในท่อแต่ละสาย และการสูญเสียพลังงานหรือการสูญเสียเฮด จะสามารถหาค่าดังกล่าวได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สมมุติอัตราการไหลในท่อสายที่ 1 เป็น Q_1
2. คำนวณหาค่า $h_{L1} = f\cdot\frac{L}{D}\cdot\frac{V^2}{2g} = \frac{8fL_1}{g\pi^2D^5}\cdot Q_1^2$
3. หาค่า Q_2 และ Q_3 จาก $h_{L1} = h_{L2} = h_{L3}$ จากสมการในข้อ (2)
4. ปรับค่า Q_1', Q_2' และ Q_3' จาก $Q_1' = \frac{Q_1 Q}{\sum Q}$, $Q_2' = \frac{Q_2 Q}{\sum Q}$, $Q_3' = \frac{Q_3 Q}{\sum Q}$ เมื่อ Q = อัตราการไหลรวม และ $\sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$
5. คำนวณค่า 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 จากภาพ ระบบท่อ 3 สายต่อระหว่างจุด A และ B แบบขนานกัน

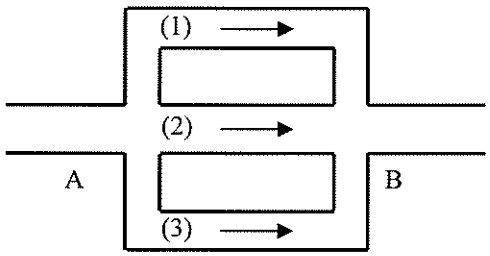
กำหนดให้ $L_1 = 3000$ ft, $D_1 = 1$ ft, $\varepsilon_1 = 0.001$ ft

$L_2 = 2000$ 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/ft^3, $\upsilon = 0.00003$ ft^2/s, $P_A = 80$ psi, $z_A = 100$ ft, $z_B = 80$ ft, อัตราการไหลรวม Q = 12 cfs

จงคำนวณหาอัตราการไหลในท่อแต่ละสาย



วิธีทำ

สมมุติ $Q_1 = 3$ cfs จะได้ $v_1 = 3.82$ ft/s

$$Re_1 = \frac{vD}{\upsilon} = \frac{\left(3.82\frac{\text{ft}}{\text{s}}\right)(1\text{ft})}{0.00003\frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 1.27\times10^5$$

$$\frac{\varepsilon_1}{D_1} = \frac{0.001\text{ft}}{1\text{ft}} = 0.001$$

จาก Moody Diagram จะได้ $f_1' = 0.022$

$$h_{L1}' = f_1' \cdot \frac{L_1}{D_1} \cdot \frac{v_1^2}{2g} = (0.022)\left(\frac{3000\text{ ft}}{1.0\text{ ft}}\right)\left(\frac{\left(3.82\frac{\text{ft}}{\text{s}}\right)^2}{2\times32.2\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}}\right) = 14.97\text{ ft}$$

สำหรับท่อที่ 2

$$14.97 = f_2' \cdot \left(\frac{2000\text{ ft}}{0.337\text{ ft}}\right) \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\frac{\varepsilon_2}{D_2} = \frac{0.0001\text{ft}}{8\text{ in}} = 0.00015$$

สมมุติ $f_2' = 0.022$

ดังนั้น $v_2 = 4.01$ ft/s และ $Re_2 = 8.9\times10^5$

จาก Moody Diagram เมื่อ $Re_2 = 8.9\times10^5$ และ $\frac{D_2}{\varepsilon_2} = 6667$ จะได้ $f_2' = 0.019$

ดังนั้น $v_2 = 4.11\frac{ft}{s}$ และ $Q_2 = 1.44\,cfs$

สำหรับท่อที่ 3

$$14.97 = f_3' \cdot \left(\frac{4000\,ft}{1.333\,ft}\right) \cdot \frac{v_3^2}{2g}$$

$$\frac{\varepsilon_3}{D_3} = \frac{0.0008\,ft}{16\,in} = 0.0006$$

สมมุติ $f_3' = 0.020$

ดังนั้น $v_3 = 4.01\,ft/s$ และ $Re_2 = 1.78\times10^5$

จาก Moody Diagram เมื่อ $Re_3 = 1.78\times10^5$ และ $\frac{\varepsilon_3}{D_3} = 0.0006$ จะได้ $f_3' = 0.020$

ดังนั้น $Q_3 = 5.60\,cfs$

จากกรณีที่สมมุติ จะได้ Q = 3.00 + 1.44 + 5.60 cfs = 10.04 cfs

ทำการปรับเทียบอัตราการไหล จะได้

$$Q_1' = \frac{3.0}{10.04}\times12\,cfs = 3.58\,cfs$$ ตอบ

$$Q_2' = \frac{1.44}{10.04}\times12\,cfs = 1.72\,cfs$$ ตอบ

$$Q_3' = \frac{5.6}{10.04}\times12\,cfs = 6.70\,cfs$$ ตอบ

ตรวจสอบว่า $h_{L1} = h_{L2} = h_{L3}$ หรือไม่

$v_1 = \frac{3.58\,cfs}{\frac{\pi}{4}(1in)^2} = 4.56\,ft/s$, $R_1 = 1.52\times10^5$, จาก Moody Diagram $f_1 = 0.021$

ดังนั้น $h_{L1} = 20.4\,ft$

$v_2 = \frac{1.72\,cfs}{\frac{\pi}{9}} = 4.93\,ft/s$, $R_2 = 1.09\times10^5$, จาก Moody Diagram $f_2 = 0.019$

ดังนั้น $h_{L2} = 21.6\,ft$

$v_3 = \frac{6.70\,cfs}{\frac{4\pi}{9}} = 4.80\,ft/s$, $R_3 = 2.13\times10^5$, จาก Moody Diagram $f_3 = 0.019$

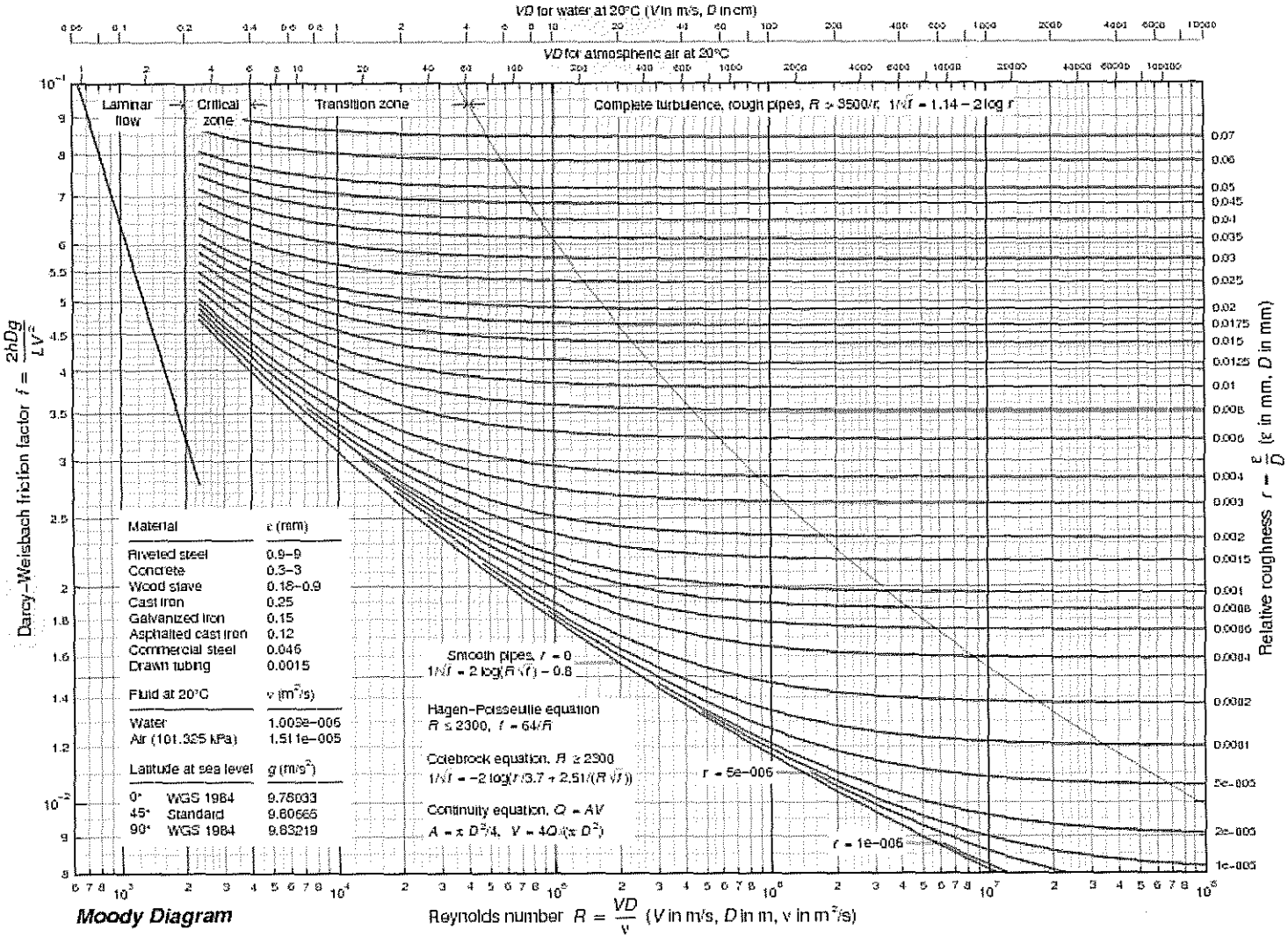
ดังนั้น $h_{L3} = 20.4\,ft$

จะเห็นว่า h_{L2} มีค่าสูงกว่าท่ออื่น แสดงว่าจำเป็นต้องปรับค่าให้เท่ากัน ซึ่งจาก Moody Diagram จะพบว่า f_2' มีค่าอยู่ระหว่าง 0.018 และ 0.019 ถ้าเลือกใช้ $f_2' = 0.018$ จะได้ $h_{L2} = 20.4$ ft พอดี จึงนำค่านี้ไปใช้

5.10 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. การไหลเข้าที่จุดร่วมใด ๆ จะต้องเท่ากับการไหลออกจากจุดร่วมนั้น
3. ในท่อสายใด ๆ จะต้องเป็นไปตามสมการของ Darcy-Weisbach



ภาพที่ 5.3 Moody Diagram

(ที่มา: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7747-moody-diagram)

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5

1. ท่อลำเลียงน้ำด้วยอัตราการไหล 20 ft^3/s ระหว่างอ่างเก็บน้ำสองแห่งที่อยู่ห่างกัน 5 mile และมีระดับความสูงที่แตกต่างกัน 200 ft เมื่อพิจารณาเฉพาะการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียด โดยใช้สมการของ Darcy และสมการของ Hazen-Williams เพื่อหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อที่จะต้องเลือกใช้ กำหนดให้ ε = 0.00015 ft และ υ = 1.2 x 10^{-5} ft^2/s

2. จงคำนวณหาการสูญเสียพลังงาน สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และความขรุขระเฉลี่ย ด้วยสมการของ Hazen-Williams สำหรับท่อเหล็กใหม่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 in ลำเลียงน้ำด้วยอัตราการไหล 2.5 cfs ท่อยาว 1000 ft และ C_h = 110

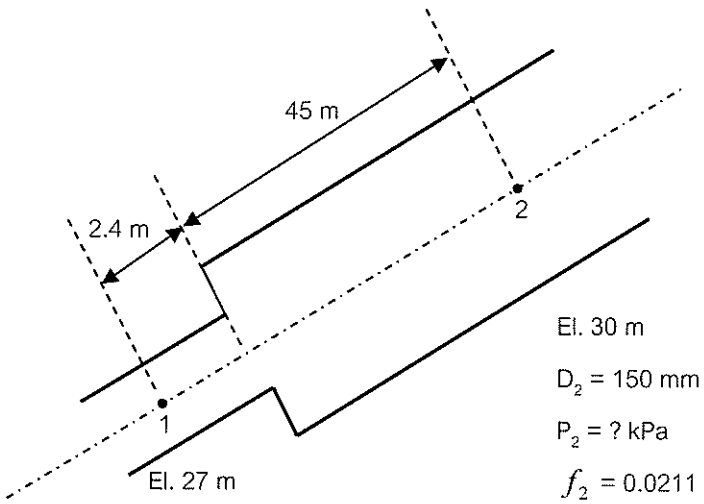
3. ท่อเหล็กใหม่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 in ยาว 1000 ft ลำเลียงน้ำจาก El. 150 ขึ้นไปยัง El. 200 ถ้าความดันที่ El. 150 และ 200 เท่ากับ 100 psi และ 72 psi ตามลำดับ จงคำนวณหาอัตราการไหลตลอดทั้งความยาวท่อ เมื่อ C_h = 110

4. จงคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อที่จะต้องใช้เพื่อลำเลียงด้วยอัตราการไหล 50 cfs จากอ่างเก็บน้ำสองแห่งที่ระดับผิวน้ำ El.200 ไปยัง El.100 และอยู่ห่างกัน 2 ไมล์ เมื่อ C_h = 110

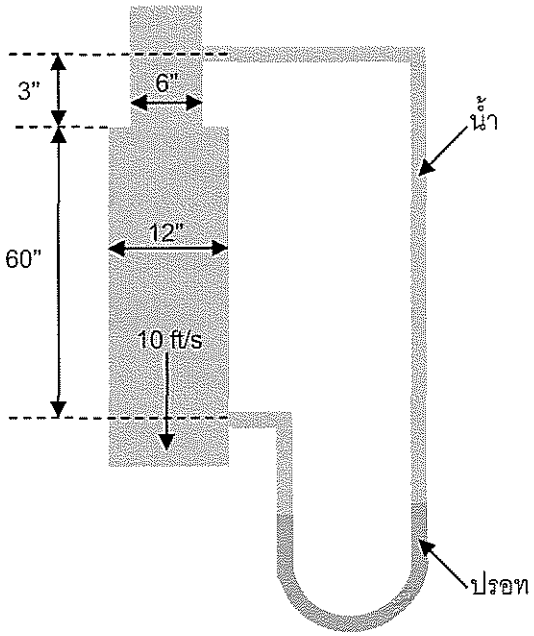
5. จงคำนวณหา C_h เมื่อการสูญเสียพลังงานจากสมการของ Darcy และสมการของ Hazen-Williams มีค่าเท่ากัน คือ 2 in และ Re = 10^5

6. น้ำไหลจากท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ด้วยอัตราการไหล 0.14 m^3/s ไปยังท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 mm วางอยู่ในแนวระดับ เมื่อความดันที่ท่อขนาด 150 mm เท่ากับ 138 kPa จงคำนวณหาความดันท่อที่ขนาด 300 mm เมื่อไม่คิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานจากท่อ

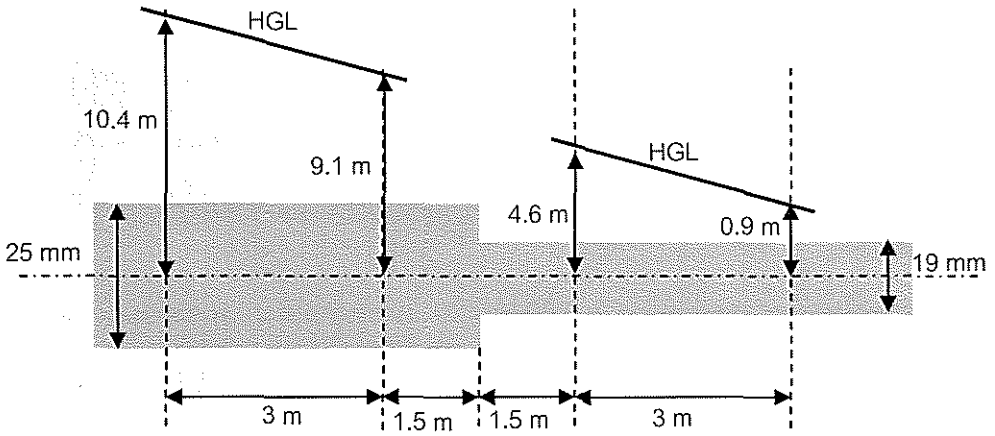
7. เมื่อของไหลมีความถ่วงจำเพาะ 0.90 R = 10^5 ไหลในท่อ ดังภาพ จงคำนวณหาความดัน ณ จุดที่ 2



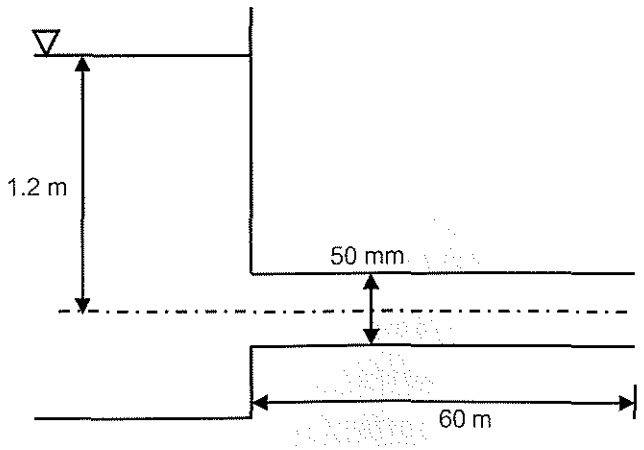
8. จากภาพ เมื่อน้ำไหลในท่อดังภาพ จงคำนวณหาว่าปรอทในมานอมิเตอร์จะอ่านค่าได้เท่าใด และมีทิศทางการเคลื่อนที่อย่างไร



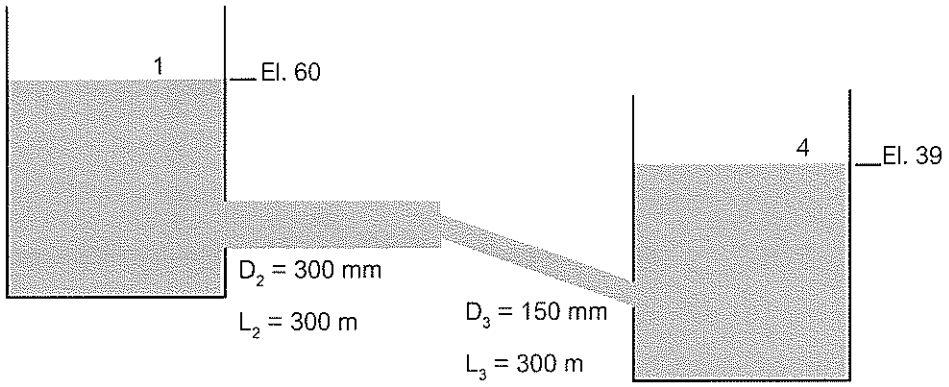
9. จากภาพ เมื่ออัตราการไหลเท่ากับ 0.0014 m^3/s จงคำนวณหาค่าการสูญเสียพลังงาน และค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบทันทีทันใด



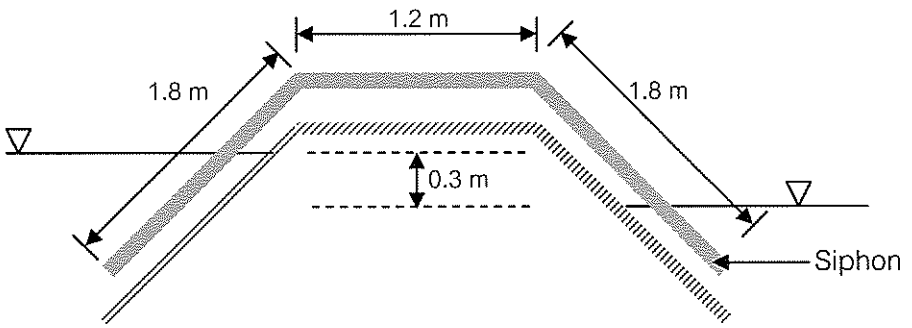
10. จากภาพ จงคำนวณหาอัตราการไหลสำหรับน้ำที่อุณหภูมิ 10°C (γ = 1.306 x 10^{-6} m^2/s)



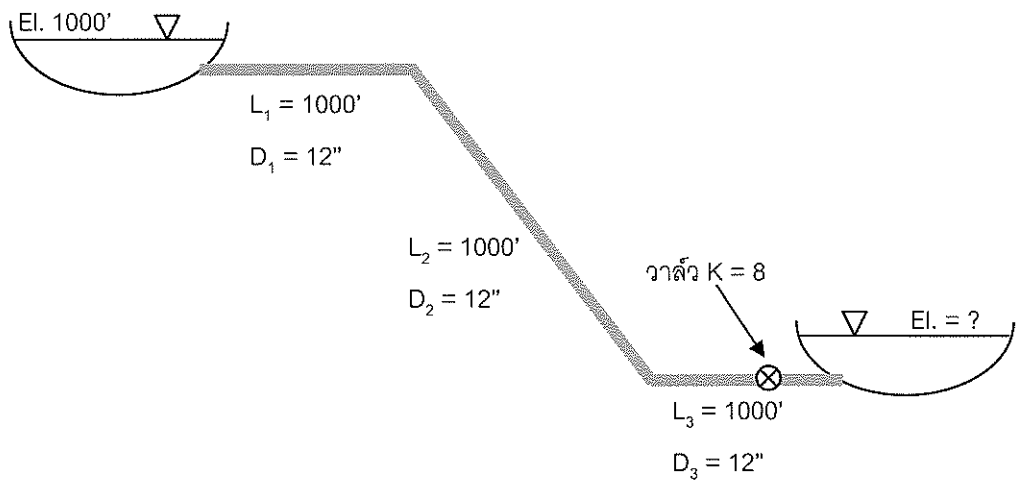
11. จากภาพ เมื่อ f = 0.02 จงคำนวณหาอัตราการไหล เมื่อไม่คิดการสูญเสียรอง



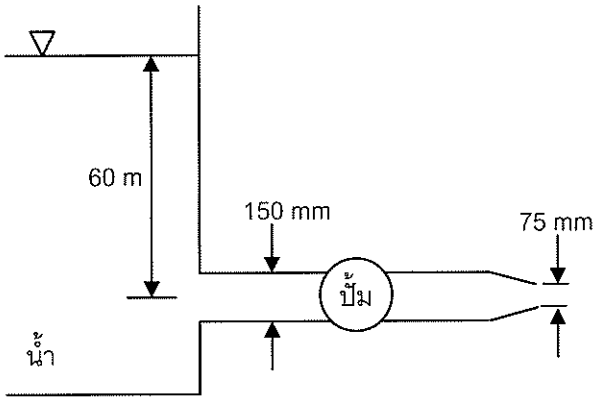
12. ระบบกาลักน้ำ (Siphon) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm ดังภาพ จงคำนวณหาอัตราการไหล เมื่อ $K_{ทางเข้า}$ = 0.8, $K_{ทางออก}$ = 1.0, $K_{ข้องอ}$ = 0.2 และ f = 0.02



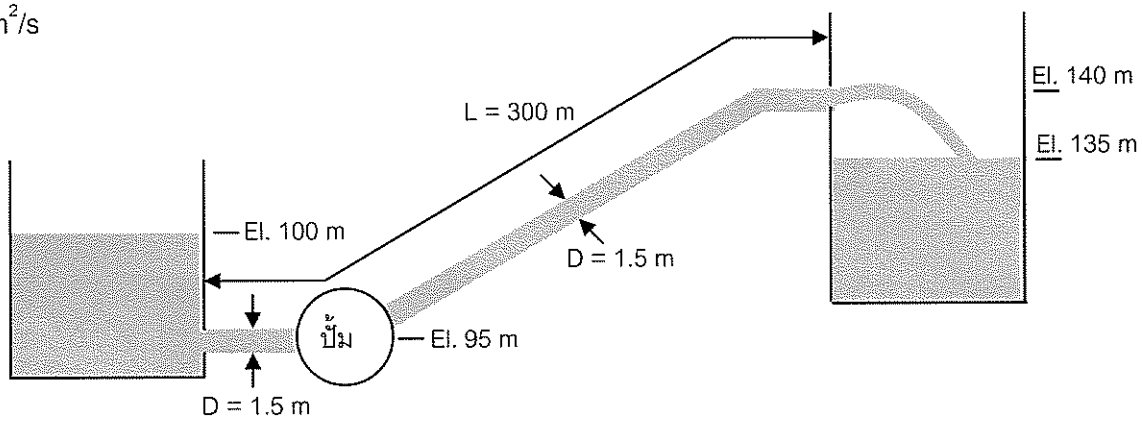
13. ท่อคอนกรีต (ε = 0.12 in) ยาว 3000 ft ลำเลียงน้ำ (ความหนืด = 1.1 x 10^{-5} ft^2/s) ระหว่างอ่างเก็บน้ำสองแห่งถ้าอัตราการไหลเท่ากับ 4.0 cfs จงคำนวณหาค่าระดับของผิวน้ำของอ่างเก็บน้ำที่อยู่ต่ำกว่า เมื่อคิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (f = 0.038) และจากวาล์วเท่านั้น



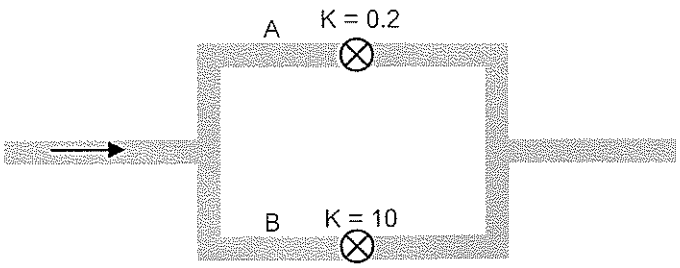
14. จากภาพ เมื่อปั๊มไม่ทำงานจะมีอัตราการไหลเท่ากับ 0.13 m^3/s จงคำนวณหากำลังงานของปั๊มที่จะต้องใช้เพื่อให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 0.17 m^3/s



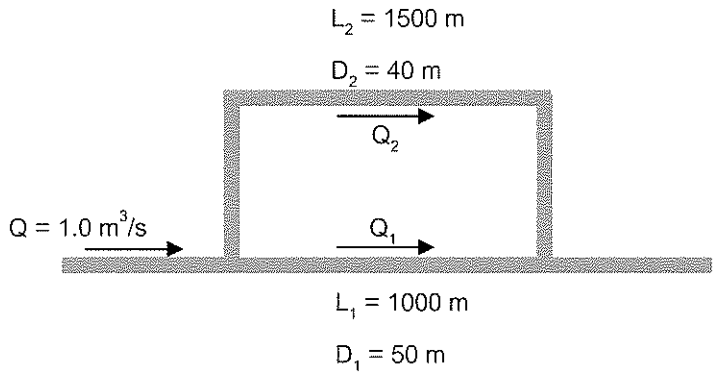
15. น้ำถูกสูบด้วยอัตรา 15 m^3/s จากอ่างเก็บน้ำ ด้วยท่อขนาด 1.5 m จงคำนวณหากำลังที่ปั๊มจะต้องใช้ กำหนดให้ $K_{รวม}$ = 0.03, f = 0.0105, $\frac{\varepsilon}{D}$ = 0.000035 และความหนืด = 1.31×10^{-6} m^2/s



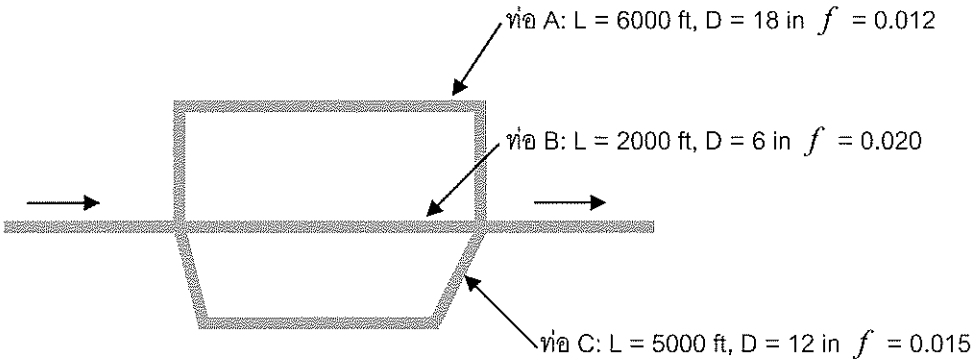
16. จากภาพ เมื่อหน้าตัดการไหลของท่อ A เป็น ¼ ของหน้าตัดการไหลของท่อ B และคิดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากวาล์วทั้งสองตัวนี้เท่านั้น จงคำนวณหาอัตราส่วนของอัตราการไหลในท่อ B ต่อท่อ A



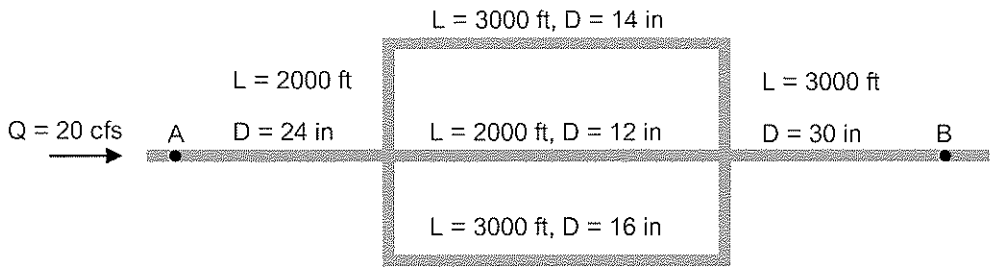
17. จากภาพ จงคำนวณหาอัตราการไหลในท่อแต่ละเส้น



18. จากภาพ จงคำนวณว่า ท่อ A, B หรือ C ที่มีความเร็วของไหลสูงสุด



19. จากภาพ เป็นท่อคอนกรีต ซึ่งท่อทุกเส้นมี f = 0.030 จงคำนวณหาการสูญเสียพลังงานจากจุด A ไปยังจุด B



20. จากภาพ เมื่อ f ของท่อทั้งสองเส้นนี้เท่ากัน จงคำนวณหาอัตราการไหลในท่อที่ 1 (Q_1)