

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ท่อความดัน (Pressure Conduit)

2.1.1 นิยามท่อความดัน

ท่อความดัน คือ ท่อที่มีการไหลเต็มพื้นที่หน้าตัดท่อและอยู่ภายใต้ความดัน การส่งน้ำด้วยท่อความดันจะประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าการส่งน้ำผ่านคลองหรือรางน้ำ เพราะสามารถวางแนวท่อไว้ได้ในระยะทางที่สั้นกว่า ซึ่งในบางที่หาหน้าได้ยาก การใช้ระบบท่อความดันจะช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำเนื่องจากการรั่วซึมและการระเหย ซึ่งมักจะเกิดขึ้นบนทางน้ำเปิด นอกจากนี้ท่อความดันยังช่วยส่งน้ำให้สาธารณะและช่วยลดโอกาสที่จะเกิดมลพิษ (Pollution) ต่างๆ

2.1.2 การแบ่งชนิดการไหลในท่อ (Classifying the flow in a pipe)

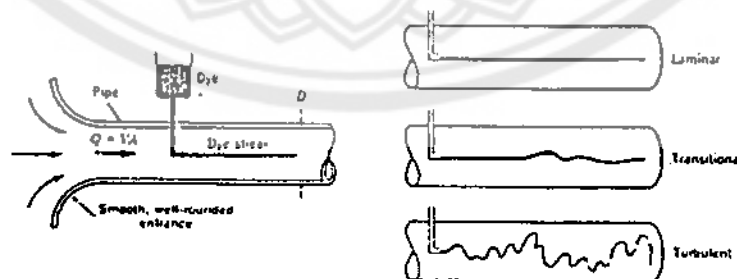
การไหลในท่อสามารถแบ่งได้หลายลักษณะคือ

2.1.2.1 การแบ่งชนิดการไหลในท่อตามเวลา สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ

- การไหลคงที่ (Steady flow) คือการไหลในท่อด้วยอัตราการไหลและความเร็วที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น การไหลในท่ออ่างเก็บน้ำที่มีระดับน้ำคงที่ หรือการไหลในท่อประปาที่มีความดันที่จุดต่อจากท่อหลักคงที่ เป็นต้น

- การไหลไม่คงที่ (Unsteady flow) คือการไหลในท่อด้วยอัตราการไหลและความเร็วเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น การไหลในท่ออ่างเก็บน้ำที่มีระดับน้ำเปลี่ยนแปลงตามเวลา การไหลในท่อเมื่อเริ่มเปิดเครื่องสูบน้ำ และการปิดเปิดประตูน้ำ เป็นต้น

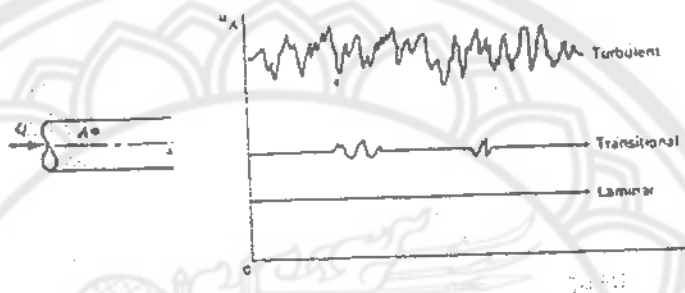
2.1.2.2 การแบ่งชนิดของการไหลในท่อตามพฤติกรรมของการไหลของน้ำ สามารถแบ่งได้จากการสังเกตเส้นแนวการไหล (Stream line) ได้ 3 ชนิดคือการไหลราบเรียบ (laminar flow) การไหลเปลี่ยนแปลง (transition flow) และการไหลปั่นป่วน (turbulent flow) ดังรูปที่ 2-1



ที่มา: กิรติ ลิวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-1 เครื่องมือและแนวเส้นลี้ที่แบ่งชนิดการไหลในท่อ

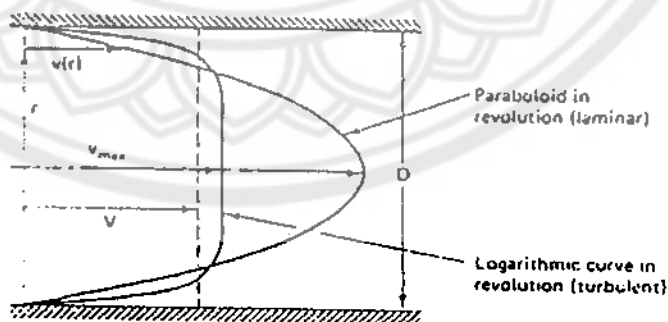
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การไหลแบบราบเรียบจะเห็นแนวเส้นสีที่แสดงถึงการไหล มีลักษณะราบเรียบเป็นเส้นตรง มีความเร็วการไหลในท่อช้า ลักษณะเรียบง่าย สำหรับการไหลเปลี่ยนแปลงจะเริ่มเห็นแนวเส้นสีกระเพื่อมเล็กน้อย และเมื่อกระแสน้ำมีความเร็วมากขึ้น กระแสน้ำจะหมุนกวนปั่นป่วน เรียกการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเมื่อพิจารณาความเร็วที่จุดใด (จุด A) ของการไหลในท่อ สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่จุด A คือ μ_A กับเวลา ของการไหลในท่อทั้ง 3 ชนิด ได้ดังรูปที่ 2-2



ที่มา: กิรติ ลีวงนกุล, [2]

รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่จุด A คือ μ_A กับเวลา ของการไหลในท่อทั้ง 3 ชนิด

เมื่อมีการวัดความเร็วของการไหลในท่อกลมที่จุดต่างๆ ตลอดหน้าตัดการไหลพบว่า ความเร็วจะมากขึ้นจากผนังท่อไปยังกึ่งกลางท่อ ทั้งนี้เนื่องจากที่บริเวณใกล้ๆ กับผนังท่อจะมีแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับผนังท่อมาก และบริเวณกึ่งกลางท่อ น้ำจะสามารถไหลผ่านได้สะดวกที่สุด จึงทำให้ตามแนวกึ่งกลางท่อมีความเร็วสูง (V_{MAX}) ดังจะเห็นได้ว่าการกระจายความเร็วของการไหลในท่อกลมการไหลแบบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ดังรูปที่ 2-3



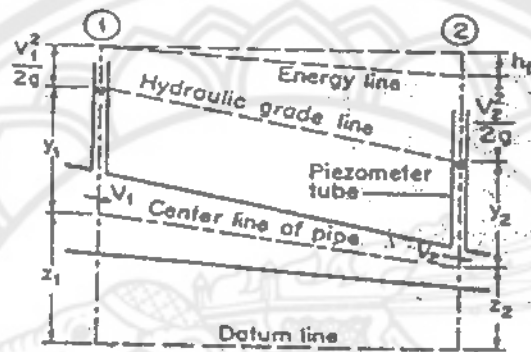
ที่มา: กิรติ ลีวงนกุล, [2]

รูปที่ 2-3 การกระจายความเร็วของการไหลในท่อกลมการไหลแบบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

จากรูปที่ 2-3 จะเห็นได้ว่า ในกรณีการไหลแบบราบเรียบ จะมีลักษณะการกระจายความเร็วในท่อกลมเป็นรูปทรงพาราโบลอยด์ (Paraboloid) คล้ายๆกับรูปไข่ได้ตัดครึ่ง ส่วนการไหลแบบปั่นป่วน จะมีลักษณะการกระจายความเร็วเป็นรูปทรงโค้งล็อก (logarithmic curve) เพราะกระแสที่มีความปั่นป่วน อย่างไรก็ตามความเร็วที่จะนำมาใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณการไหลในท่อที่ใช้ในงานวิศวกรรมชลศาสตร์ จะใช้ความเร็วเฉลี่ยเป็นหลัก

2.1.3 ขอบข่ายการไหลคงที่ในท่อ (hydraulics of steady flow in closed conduits)

พิจารณาการไหลในท่อดังรูปที่ 2-4



ที่มา: กิรติ ลิวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-4 การไหลในท่อ

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลคงที่ประกอบด้วย

2.1.3.1 สมการการไหลต่อเนื่อง (continuous equation)

"อัตราการไหลผ่านหน้าตัด 1 เท่ากับอัตราการไหลผ่านหน้าตัด 2"

อัตราการไหล $Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$ 2-1

เมื่อ A_1 และ A_2 คือ พื้นที่หน้าตัด 1 และ พื้นที่หน้าตัด 2 ตามลำดับ

V_1 และ V_2 คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหลผ่านหน้าตัด 1 และ หน้าตัด 2 ตามลำดับ

2.1.3.2 สมการพลังงาน (energy equation)

พลังงานหลักของการไหลในท่อมมี 3 ส่วนหลักคือ

- พลังงานศักย์ (potential energy) คือพลังงานที่เทียบจากจุดกึ่งกลางของท่อกับระดับอ้างอิง (datum line) เช่นที่หน้าตัด 1 มีพลังงานศักย์คือ Z_1 และ ที่หน้าตัดที่ 2 มีพลังงานศักย์คือ Z_2

- พลังงานความดัน (pressure energy) คือพลังงานเนื่องจากความดันของการไหลในท่อ ในทางชลศาสตร์จะเทียบกับจุดกึ่งกลางท่อ เช่น เมื่อมีการไหลในท่อแล้วพบว่าที่จุดกึ่งกลางหน้าตัด 1 ของท่อมมีความดันเท่ากับ p_1 โดยของไหลมีน้ำหนักจำเพาะ γ ถ้าใช้หลอดแก้วใส

(piezometer tube) ปีกบนท่อจะพบวาระดับของของไหลจะสูงขึ้นเท่ากับ y_1 แสดงว่าที่จุดกึ่งกลางหน้าตัด 1 มีความดัน $P_1 = y_1\gamma$ หรือเมื่อคิดเป็นความสูงของไหลได้ $y_1 = P_1/\gamma$ ในทำนองเดียวกันที่หน้าตัด 2 จะมี $P_2 = y_2\gamma$ หรือ $y_2 = P_2/\gamma$

- พลังงานจลน์ (kinetic energy) คือพลังงานเนื่องจากการไหลของน้ำในท่อ เช่นที่หน้าตัด 1 มีความเร็วเฉลี่ย V_1 จะมีพลังงานจลน์เท่ากับ $V_1^2/2g$ และที่หน้าตัด 2 มีความเร็วเฉลี่ย V_2 จะมีพลังงานจลน์เท่ากับ $V_2^2/2g$

เนื่องจากการไหลในท่อ จะมีการสูญเสียพลังงานในท่อเรียกว่า การสูญเสียหลัก (major loss, h_f) เป็นการสูญเสียพลังงานเนื่องจาก

1. แรงเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังท่อ
2. การไหลที่โค้งเอียงความหนืดหรือที่เรียกว่าการกระจายความหนืดเนื่องจากการไหลในท่อ

จากรูปที่ 2-4 สามารถเขียนสมการพลังงานระหว่างหน้าตัดที่ 1 และหน้าตัดที่ 2 ได้

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

แต่ละเทอมในสมการที่ 2-2 ต่างก็มีหน่วยเป็น ft-lb ของพลังงานต่อ lb ของการไหลของของเหลว หรือ ft (ในระบบหน่วยอังกฤษ) และมีหน่วยเป็น N-m ของพลังงานต่อ N ของการไหลของไหล หรือ m (ในหน่วย SI)

2.1.3.3 หลักการแรงดล-โมเมนตัม

หามาได้โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน การไหลของของไหลอาจเป็นแบบ steady หรือ unsteady flow, ของไหลอาจเป็นแบบอัดตัวได้ หรืออัดตัวไม่ได้, อาจเป็นของไหลจริงหรือของไหลอุดมคติก็ได้. ในการพิจารณาเกี่ยวกับโมเมนตัมจะไม่พิจารณาถึงการสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่

กฎข้อที่สองของนิวตัน เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad 2-3$$

หรือ

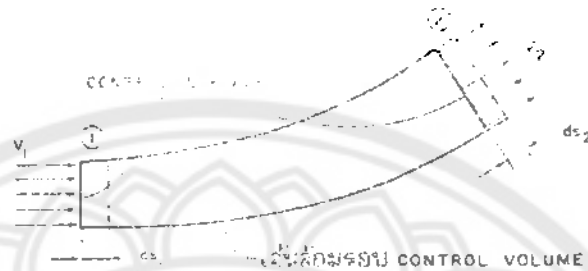
$$\Sigma \vec{F} = \frac{d(m\vec{V})}{dt} \quad 2-4$$

ซึ่งมีความหมายว่า, ผลรวมของแรงภายนอกที่กระทำกับวัตถุมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของวัตถุ

เนื่องจาก \vec{F} และ \vec{V} เป็นปริมาณเวกเตอร์ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมจึงเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันกับที่แรงกระทำ. สมการ 2-4 อาจเขียนได้ใหม่เป็น

$$\Sigma \vec{F}(dt) = d(m\vec{V}) \quad 2-5$$

ซึ่งมีความหมายว่า แรงคลมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม อันเป็นหลักการแรงคล-โมเมนตัม
ต่อไปจะใช้สมการ 2-4 กับวัตถุซึ่งมีมวลอยู่ใน control volume ดังรูป 2-5 ในที่นี้ถือว่า
control volume มีตำแหน่งแน่นอน , ไม่มีการเคลื่อนที่ , ไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือขนาด



ที่มา: ชาญ ถนัดงาน, [4]

รูปที่ 2-5 ของไหลใน control volume

พิจารณาของไหลใน control volume ดังรูป 2.5 เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์มักเลือก
ให้ control surface ตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วดังรูป สมมติว่าความเร็วของของไหลมีค่าคงที่
ตลอดทั้ง control surface เมื่อเวลา t ของไหลบรรจุอยู่เต็ม control volume ระหว่างหน้าตัด 1 กับ 2
เมื่อเวลาผ่านไป dt ของไหลเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ตำแหน่งใหม่ สมมติว่าที่หน้าตัด 1 เคลื่อนที่ไป ds_1 และ
ที่หน้าตัด 2 เคลื่อนที่ไป ds_2 พิจารณาเฉพาะกรณีของไหลเคลื่อนที่แบบ steady flow

โมเมนตัมที่ผ่าน control surface ที่หน้าตัด 1 ในช่วงเวลา dt คือ $(\rho_1 A_1 ds_1) V_1$

โมเมนตัมที่ผ่าน control surface ที่หน้าตัด 2 ในช่วงเวลา dt คือ $(\rho_2 A_2 ds_2) V_2$

จากสมการ 2.4 เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} &= \frac{d(mV)}{dt} \text{ ออก} - \frac{d(mV)}{dt} \text{ เข้า} \\ &= \frac{1}{dt} (\rho_2 A_2 ds_2) \vec{V}_2 - \frac{1}{dt} (\rho_1 A_1 ds_1) \vec{V}_1 \end{aligned} \quad 2-6$$

แต่เนื่องจาก $V = ds/dt$ และ $Q = AV$ ดังนั้น

$$\Sigma \vec{F} = \rho_2 Q_2 \vec{V}_2 - \rho_1 Q_1 \vec{V}_1 \quad 2-7$$

จากสมการความต่อเนื่องและของไหลเคลื่อนที่แบบ steady flow

$$\rho Q = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad 2-8$$

ดังนั้น

$$\Sigma \vec{F} = \rho Q (\vec{V}_2 - \vec{V}_1) = \rho Q (\Delta \vec{V}) \quad 2-9$$

ทิศทางของ $\Sigma \vec{F}$ จะอยู่ในทิศทางเดียวกับ $\Delta \vec{V}$

2.1.3.4 แรงบนท่อความดัน

พิจารณากรณีของไหลเคลื่อนที่ผ่านท่อลดในแนวระดับดังรูปที่ 2-6(ก)ซึ่งสามารถเขียน free body diagram ของมวลของไหล แสดงแรงที่กระทำกับมวลของของไหลได้ดังรูปที่ 2-6(ข)



รูปที่ 2-6 ของไหลที่ผ่านท่อลด

ใช้สมการ $\Sigma F_x = \rho_2 Q_2 V_{2x} - \rho_1 Q_1 V_{1x} = \rho Q (\Delta V_x)$ กับมวลของไหลเพื่อหาแรงที่กระทำกับมวลของของไหลในแนวแกน X จะได้ว่า

$$\Sigma F_x = P_1 A_1 - P_2 A_2 - (F_{R/F})_x = \rho Q (V_2 - V_1) \quad 2-10$$

พิจารณาในแนวแกน Y ไม่มีแรงอื่นใดกระทำกับท่อลด นอกจากน้ำหนักของของไหลในท่อลด ดังนั้นแรงในแนวแกน Y จึงมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของไหลในท่อลด

2.1.4 การสูญเสียรองในระบบท่อ(minor losses in pipeline)

การสูญเสียรองในระบบที่เป็นการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อ การไหลผ่านข้อต่อ ข้องอ ประตูน้ำ และการเชื่อมต่อท่อ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้แนวการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลง ถ้าเป็นแนวท่อยาวก็อาจจะไม่คิดผลของการสูญเสียรองเพราะมีค่าน้อยมาเมื่อเทียบกับการสูญเสียหลัก ถ้าเป็นท่อสั้น การสูญเสียรองจะมีผลมากขึ้น และเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องพิจารณาประกอบการวิเคราะห์ระบบท่อด้วย ซึ่งการสูญเสียรองจะมีค่ามากเมื่อความเร็วของกระแส น้ำมากขึ้น เพราะจะทำให้เกิดการไหลวน(eddies)ที่ทำให้เกิดการแยกตัวของการไหลออกจากขอบเขตของท่อ

การสูญเสียรองมักจะมีความสัมพันธ์กับหัวความเร็ว(velocity head) โดยคิดเป็นจำนวนเท่าของหัวความเร็ว ดังสมการ

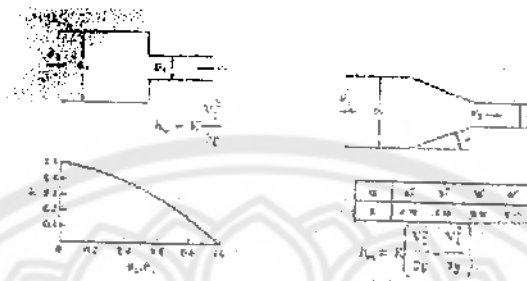
$$h_m = K \frac{V^2}{2g} \quad 2-11$$

หรือ

$$h_m = K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad 2-12$$

$$h_m = K \left[\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right] \quad 2-13$$

โดยที่ K คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง(minor losses coefficient)ขึ้นอยู่กับชนิด รูปร่าง ลักษณะ วัสดุ และขนาดของอุปกรณ์ท่อ โดยมีค่า K ที่บริเวณรอยต่อของท่อลดขนาดดังรูปที่ 2-7 และค่า K ของการไหลออกจากท่อดังตารางที่ 2-1



ที่มา: กীরติ สิวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-7 ค่า K บริเวณรอยต่อของท่อลดขนาด

ตารางที่ 2-1 ค่า K ของการไหลออกจากท่อ

ชนิดการไหล	ภาพ	ค่า K เมื่อ $h_L = K \frac{V^2}{2g}$
1. พัดลมออกท่อจากถัง (fan discharging into tank)		
2. พัดลมเข้าท่อจากถัง (fan discharging into tank)		1.0

ที่มา: กীরติ สิวจนกุล, [2]

ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงภาคตัด โดยการใส่ทรงกรวยตัดต่อระหว่างภาคตัดทั้ง 2 ในการหาการสูญเสียพลังงานของการขยายภาคตัดพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย นอกจากจะขึ้นอยู่กับมุมของทรงกรวยแล้วยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพื้นที่ของท่อที่ต่อกันด้วย เป็นที่สังเกตว่า

1. ค่ามุมทรงกรวยที่ดีที่สุดคือ ประมาณ 7° ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ต่ำสุด
2. ถ้าค่ามุมทรงกรวยอยู่ประมาณ 60° การสูญเสียของพลังงานจะสูงกว่าการขยายภาคตัดอย่างฉับพลัน

ในทางตรงกันข้ามการใช้ทรงกรวยขนาดสั้น หรือการตัดแปลงทรงกรวยให้เป็นรูปเหลี่ยม ในการต่อท่อลดการสูญเสียพลังงานมีน้อยมากจนตัดทิ้งได้