บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 ท่อความดัน (Pressure Conduit)

2.1.1 นิยามท่อความดัน

ท่อความดัน คือ ท่อที่มีการไหลเต็มพื้นที่หน้าตัดท่อและอยู่ภายใต้ความดัน การส่งน้ำด้วยท่อความดันจะประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าการส่งน้ำผ่านคลองหรือรางน้ำ เพราะสามารถวางแนวท่อไว้ได้ในระยะทางที่สั้นกว่า ซึ่งในบางพื้นที่หาน้ำได้ยาก การใช้ระบบท่อความดันจะช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำเนื่องจากการรั่วซึมและการระเหย ซึ่งมักจะเกิดขึ้นบนทางน้ำเปิด นอกจากนี้ท่อความดันยังช่วยส่งน้ำใช้สาธารณะและช่วยลดโอกาสที่จะเกิดมลพิษ (Pollution)ต่างๆ

2.1.2 การแบ่งชนิดการไหลในท่อ (Classifying the flow in a pipe)

การไหลในท่อสามารถแบ่งได้หลายลักษณะคือ

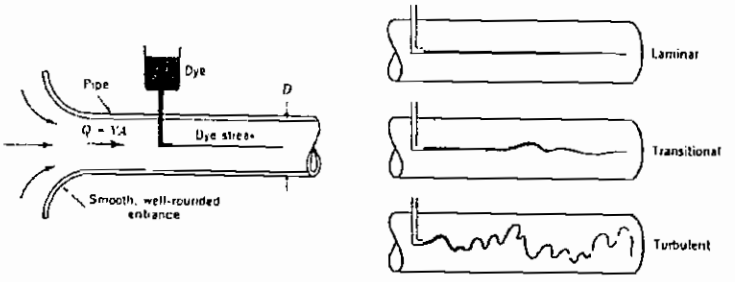
2.1.2.1 การแบ่งชนิดของการไหลในท่อตามเวลา สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ

- การไหลคงที่ (Steady flow) คือการไหลในท่อด้วยอัตราการไหลและความเร็วคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น การไหลในท่อออกจากอ่างเก็บน้ำที่มีระดับน้ำคงที่ หรือการไหลในท่อประปาที่มีความดันที่จุดต่อจากท่อหลักคงที่ เป็นต้น

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

2.1.2.2 การแบ่งชนิดของการไหลในท่อตามพฤติกรรมของการไหล

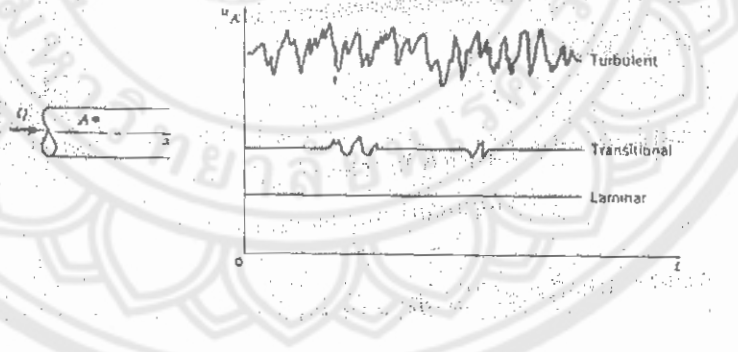
สามารถแบ่งได้จากการสังเกตเส้นแนวการไหล (Stream line) ได้ 3 ชนิด คือ การไหลราบเรียบ (laminar flow) การไหลเปลี่ยนแปลง (transition flow) และการไหลปั่นป่วน (turbulent flow) ดังรูปที่ **2-1**



ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-1 เครื่องมือและแนวเส้นสีที่แบ่งชนิดการไหลในท่อ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การไหลแบบราบเรียบจะเห็นแนวเส้นสีที่แสดงถึงการไหลมีลักษณะราบเรียบเป็นเส้นตรง มีความเร็วของการไหลในท่อช้า ลักษณะเรียบง่าย สำหรับการไหลเปลี่ยนแปลงจะเริ่มเห็นแนวเส้นสีกระเพื่อมเล็กน้อย และเมื่อกระแสน้ำมีเร็วมาก ๆ กระแสน้ำจะหมุนควนปั่นป่วน เรียกการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเมื่อพิจารณาความเร็วที่จุดใด (จุด A) ของการไหลในท่อ สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่จุด A คือ u_A กับเวลา t ของการไหลในท่อทั้ง 3 ชนิดนี้ ได้ดังรูปที่ 2-2

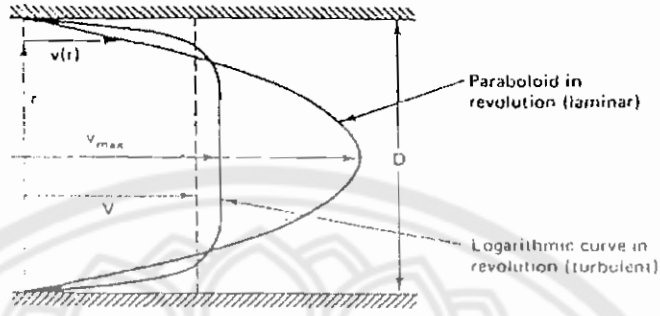


ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่จุด A กับเวลา t ของการไหลในท่อทั้ง 3 ชนิด

เมื่อมีการวัดความเร็วของการไหลในท่อกลมที่จุดต่าง ๆ ตลอดหน้าตัดการไหลพบว่า ความเร็วจะมากขึ้นจากผนังท่อไปยังกึ่งกลางท่อ ทั้งนี้เนื่องจากที่บริเวณใกล้ ๆ กับผนังท่อจะมีแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับผนังท่อมาก และที่บริเวณกึ่งกลางท่อ น้ำจะสามารถไหลผ่านได้สะดวกที่สุด จึงทำ

ให้ตามแนวกึ่งกลางท่อมีความเร็วสูง (V_{max}) ดังจะเห็นได้ว่าจากการกระจายความเร็วของการไหลในท่อกลมการไหลแบบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ดังรูปที่ 2-3

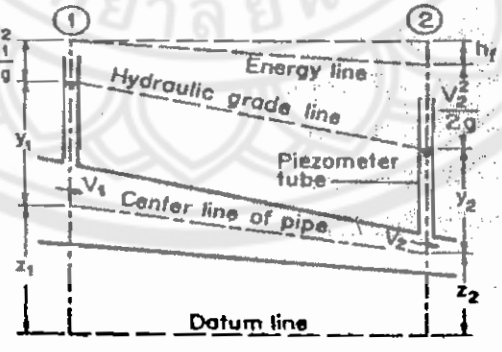


ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-3 การกระจายความเร็วของ การไหลในท่อกลมการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

จากรูปที่ 2-3 จะเห็นได้ว่า ในกรณีของการไหลแบบราบเรียบ จะมีลักษณะการกระจายความเร็วในท่อกลมเป็นรูปทรงพาราโบลอยด์ (Paraboloid) คล้าย ๆ กับรูปไข่ไก่ตัดครึ่ง ส่วนกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน จะมีลักษณะการกระจายความเร็วเป็นรูปทรงโค้งล็อค (logarithmic curve) เพราะกระแสน้ำมีความปั่นป่วน อย่างไรก็ตามความเร็วที่จะนำมาใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณการไหลในท่อที่ใช้ในงานวิศวกรรมชลศาสตร์ จะใช้ความเร็วเฉลี่ยเป็นหลัก

2.1.3 ชลศาสตร์การไหลคงที่ในท่อ (hydraulics of steady flow in closed conduits) พิจารณาการไหลในท่อดังรูปที่ 2-4



ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-4 การไหลในท่อ

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลคงที่ในท่อประกอบด้วย

2.1.3.1 สมการการไหลต่อเนื่อง (continuous equation)

"อัตราการไหลผ่านหน้าตัด 1 เท่ากับอัตราการไหลผ่านหน้าตัด 2"

อัตราการไหล $$Q = A_1V_1 = A_2V_2 \qquad (2-1)$$

เมื่อ A_1 และ A_2 คือ พื้นที่หน้าตัด 1 และพื้นที่หน้าตัด 2 ตามลำดับ

V_1 และ V_2 คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหลผ่านหน้าตัด 1 และหน้าตัด 2 ตามลำดับ

2.1.3.2 สมการพลังงาน (energy equation)

พลังงานหลักของการไหลในท่อมี 3 ส่วนหลัก คือ

- พลังงานศักย์ (potential energy) คือพลังงานที่เทียบจากจุดกึ่งกลางท่อกับระดับอ้างอิง (datum line) เช่นที่หน้าตัด 1 มีพลังงานศักย์ คือ Z_1 และที่หน้าตัด 2 มีพลังงานศักย์ คือ Z_2

- พลังงานความดัน (pressure energy) คือพลังงานเนื่องจากความดันของการไหลในท่อ ในทางชลศาสตร์จะเทียบกับจุดกึ่งกลางท่อ เช่น เมื่อมีการไหลในท่อแล้วพบว่าที่จุดกึ่งกลางหน้าตัด 1 ของท่อมีความดันเท่ากับ P_1 โดยของไหลมีน้ำหนักจำเพาะ γ ถ้าใช้หลอดแก้วใส (piezometer tube) ปักบนท่อจะพบว่าระดับของของไหลสูงขึ้นเท่ากับ y_1 แสดงว่าที่จุดกึ่งกลางหน้าตัด 1 มีความดัน $P_1 = \gamma y_1$ หรือ เมื่อคิดเป็นความสูงของไหลได้ $y_1 = P_1/\gamma$ ในทำนองเดียวกันที่หน้าตัด 2จะมี $P_2 = \gamma y_2$ หรือ $y_2 = P_2/\gamma$

- พลังงานจลน์ (kinetic energy) คือ พลังงานเนื่องจากการไหลของน้ำในท่อ เช่น ที่หน้าตัด 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. **การไหลที่ต้องเอาชนะความหนืดหรือที่เรียกว่าการกระจายความหนืดเนื่องจากการไหลในท่อ**

จากรูปที่ 2-4 สามารถเขียนสมการพลังงานระหว่างหน้าตัดที่ 1 และหน้าตัดที่ 2 ได้

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

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

2.1.3.3 สมการโมเมนต์ของโมเมนตัมสำหรับปริมาตรควบคุมคงที่

สมการโมเมนต์ของโมเมนตัมสำหรับระบบ ก็คือทอร์คทั้งหมดที่กระทำต่อระบบเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงมุมของระบบนั้น
ในที่นี้ทอร์คที่กระทำต่อระบบคือ

$$\bar{T}_{\text{ระบบ}}=\vec{r}\times\vec{F}_s+\int\vec{r}\times\vec{g}dm+\bar{T}_{\text{เพลา}} \qquad (2-3)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงมุมของระบบคือ

$$\vec{r}\times\vec{F}_s+\int_{cv}\vec{r}\times\vec{g}\rho dV+\bar{T}_{\text{เพลา}}=\frac{\partial}{\partial t}\int_{cv}\vec{r}\times\vec{V}\rho dV+\int_{cs}\vec{r}\times V\rho dV \qquad (2-4)$$

การประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกลของไหล ภายใต้ข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้ ทอร์คเนื่องจากแรงกระทำที่ผิว $\left(\vec{r}\times\vec{F}_s\right)$ ถือว่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ ทอร์คเนื่องจากน้ำหนักของไหลสามารถตัดทิ้งได้ (เนื่องจากความสมมาตร) และพิจารณาให้เป็นการไหลแบบคงตัว ดังนั้นจากสมการ 2 – 4 สามารถเขียนได้เป็น

$$\bar{T}_{\text{เพลา}}=\int_{cs}\vec{r}\times\vec{V}\rho\vec{V}_{xyz}\cdot d\vec{A} \qquad (2-5)$$

สำหรับการไหลสม่ำเสมอเข้าสู่ใบจักรที่หน้าตัด 1 และออกจากใบจักรที่หน้าตัด 2 สมการ 2 – 5 จะได้เป็น

$$T_{\text{เพลา}}=\rho Q\left(r_2V_{t2}-r_2V_{t1}\right) \qquad (2-6)$$

อัตราการทำงานที่ให้ต่อใบจักรที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω คือ

$$\dot{W} = \omega T_{เพลา} = \omega\rho Q(r_2 V_{t2} - r_1 V_{t1}) \qquad (2-7)$$

2.1.4 การสูญเสียรองในระบบท่อ (minor losses in pipeline)

การสูญเสียรองในระบบท่อเป็นการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อ การไหลผ่านข้อต่อ ข้องอ ประตูน้ำ และการเชื่อมต่อท่อ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้แนวการไหลมีการเปลี่ยนแปลง ถ้าเป็นแนวท่อยาวก็อาจจะไม่คิดผลของการสูญเสียรองเพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียหลัก ถ้าเป็นท่อสั้น การสูญเสียรองจะมีผลมากขึ้น และเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องพิจารณาประกอบการวิเคราะห์ระบบท่อด้วย ซึ่งการสูญเสียรองจะมีค่ามากเมื่อความเร็วของกระแสน้ำมากขึ้น เพราะจะทำให้เกิดการไหลวกวน (eddies) ที่ทำให้เกิดการแยกตัวของการไหลออกจากขอบเขตของท่อ (conduit boundary)

การสูญเสียรองมักจะมีความสัมพันธ์กับหัวความเร็ว (velocity head) โดยคิดเป็นจำนวนเท่าของหัวความเร็ว ดังสมการ

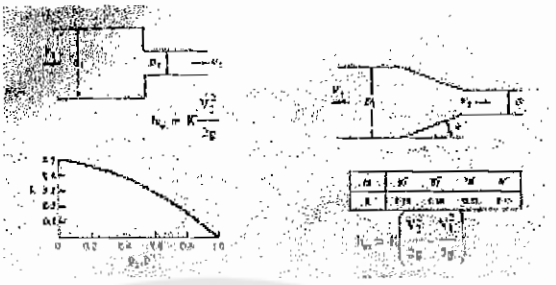
$$h_m = K\frac{V^2}{2g}$$

หรือ

$$h_m = K\frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \qquad (2-8)$$

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

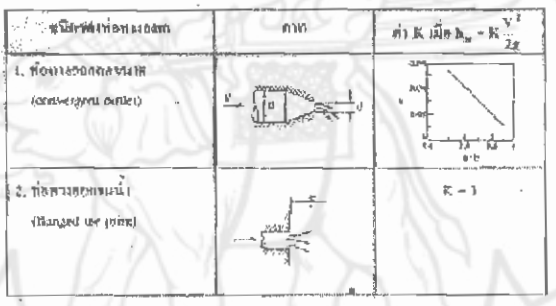
โดยที่ K คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (minor losses coefficient) ขึ้นอยู่กับชนิด รูปร่าง ลักษณะวัสดุ และขนาดของอุปกรณ์ท่อ โดยมีค่า K ที่บริเวณรองต่อของท่อลดขนาดดังรูปที่ **2-5** และค่า K ของการไหลออกจากท่อดังตารางที่ **2-1**



ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล,[2]

รูปที่ 2-5 ค่า K บริเวณรอยต่อของท่อลดขนาด

ตารางที่ 2-1 ค่า K ของการไหลออกจากท่อ



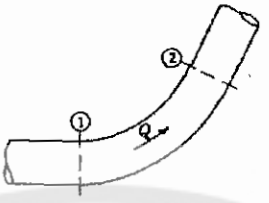
ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล,[2]

ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงภาคตัด โดยการใช้ทรงกรวยตัดต่อระหว่างภาคตัดทั้ง 2 ในการหาการสูญเสียพลังงานของการรขยายภาคตัดพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย นอกจากจะขึ้นอยู่กับมุมของทรงกรวยแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพื้นที่ของท่อที่ต่อกันด้วย เป็นที่สังเกตว่า

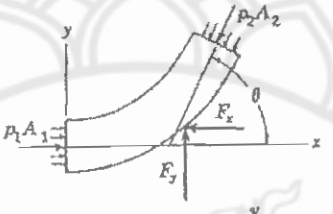
1. ค่ามุมทรงกรวยที่ดีที่สุดคือ ประมาณ 7^0 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ต่ำสุด
2. ถ้าค่ามุมทรงกรวยอยู่ประมาณ 60^0 การสูญเสียของพลังงานจะสูงกว่าการขยายภาคตัดอย่างฉับพลัน

ในทางตรงกันข้ามการใช้ทรงกรวยขนาดสั้น หรือการดัดแปลงทรงกรวยให้เป็นรูปเพรียว ใน**การต่อท่อลดการสูญเสียพลังงานมีน้อยมากจนตัดทิ้งได้**

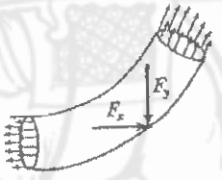
2.1.5 แรงที่ข้องอและที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลง (forces at bends and changes in cross section)



(ก) การไหลผ่านข้องอ



(ข) ภาพตัดอิสระของน้ำในข้อง



แรงตามแนวยาว $= \sigma(\pi d)t$

โดยที่ σ คือ ความเค้นตามแนวยาว

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

และ t คือ ความหนาของผนังท่อ

(ค) ภาพตัดอิสระของข้องอโดยไม่มีอะไรยึดท่อ

ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล,[2]

รูปที่ 2-6 แรงต่าง ๆ ที่ข้องอของท่อที่วางอยู่ในแนวราบ

การเปลี่ยนแปลงทิศทางและขนาดความเร็วของกระแสน้ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของของไหล จากการเปลี่ยนแปลงความดันของของไหลในท่อ และจะถ่ายทอดจากผนังท่อไปยังของไหลดังเช่นในรูปที่ **2-6** ได้แสดงแผนภาพของแรงต่าง ๆ ที่เป็นผลมาจากกระแสน้ำที่ไหลผ่านข้องอของท่อที่วางอยู่ในแนวราบ

ประยุกต์ใช้สมการโมเมนตัม (impulse-momentum principle) จะได้

$$p_1 A_1 - F_x - p_2 A_2 \cos\theta = \rho Q(V_2 \cos\theta - V_2) \qquad (2-11)$$

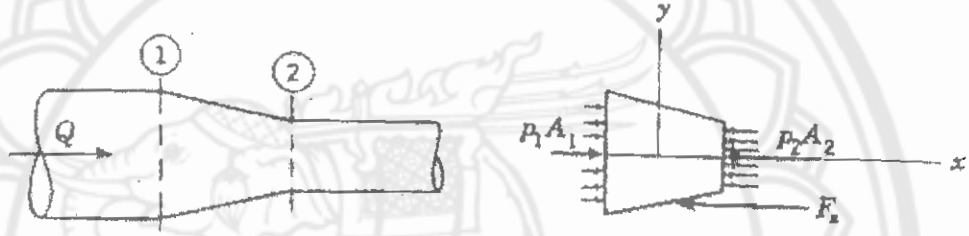
$$F_y - p_2 A_2 \sin\theta = \rho Q V_2 \sin\theta \qquad (2-12)$$

เมื่อ p_1 และ p_2 คือ ความดันที่หน้าตัด 1 และ หน้าตัด 2 ตามลำดับ

V_1 และ V_2 คือ ความเร็วเฉลี่ยที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2 ตามลำดับ

สำหรับข้องอของท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอคงที่ จะมี $V_1 = V_2$ และ $p_1 \approx p_2$ ทำให้การสูญเสียพลังงานมีค่าน้อยมาก ตลอดความยาวของข้องอที่สั้น ๆ

ในทำนองเดียวกัน เมื่อเป็นข้อต่อตรง ดังเช่น รูปที่ 2-7 เป็นข้อต่อตรงแบบค่อย ๆ ลดขนาดท่อ สามารถประยุกต์สมการโมเมนตัมหาขนาดของแรง F_x ได้



ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-7 แรงที่ข้อต่อตรงค่อย ๆลดขนาด

จากรูปที่ 2-7 เมื่อใช้สมการโมเมนตัมจะได้

$$p_1 A_1 - F_x - p_2 A_2 = \rho Q(V_2 - V_1)$$

เมื่อวิเคราะห์แรง F_x หรือ F_y ที่กระทำต่อข้องอหรือข้อต่อตรงที่เกิดโมเมนตัมของน้ำ ก็สามารถถ่ายแรงต่าง ๆ เหล่านี้ ไปยังจุดยึดท่อที่อาจจะเป็นเหล็กรัดท่อหรือฐานรองรับท่อได้ ทำให้สามารถออกแบบขนาดทางโครงสร้างต่อไปได้

2.2 <u>เครื่องจักรกลที่มีการหมุน</u> (Turbomachine)

2.2.1 เครื่องกลของไหล (แบบใบจักร)

หลักการทำงานของเครื่องกลของไหลคือ การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างเครื่องกลกับของไหลโดยการเปลี่ยนทิศทางของลำของไหลหรือขนาดความเร็วของการไหลก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังพลเป็นผลให้เกิดแรงกระทำระหว่างใบจักรกับลำของไหลโดยงานที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของใบจักร

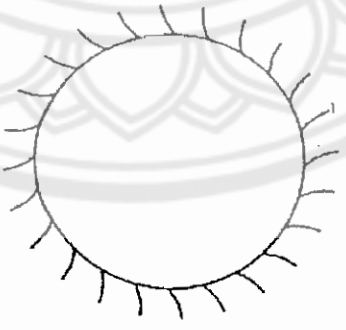
เครื่องกลของไหลทำงานต่อของไหลหรือไม่ก็ดึงงานออกจากของไหลติดต่อกัน โดยให้ไหลผ่านชุดใบจักรที่เคลื่อนที่ ถ้าพิจารณาการไหลผ่านใบจักรต่อเนื่องแบบง่ายชนิดที่อยู่กับที่ (รูปที่ **2-8**) Vector ความเร็วการไหลจะถูกบ่ายเบนตามมุมของใบจักรต่อเนื่องที่ไหลผ่านจะมีแรงกระทำต่อของไหล แต่ถ้าไม่นับผลจากการความฝืดและความอลวนจะไม่มีงานกระทำต่อของไหล

$$T = \rho Q r V_t \qquad (2-13)$$

ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-8 ใบจักรต่อเนื่องอย่างง่าย

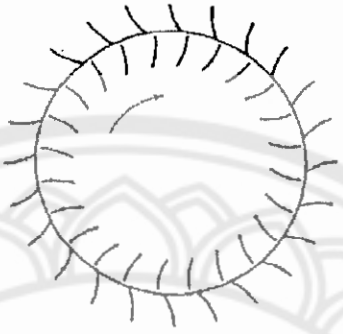
เนื่องจากเครื่องกลของไหลเกิดงานได้จากการหมุน ระบบใบจักรต่อเนื่องอาจจัดให้สมมาตรรอบขอบของวงกลม (รูปที่ **2-9**) ถ้าของไหลกระทบใบจักรต่อเนื่องที่อยู่กับที่ในทิศทางรัศมี ค่าโมเมนต์ของพลังพลจะเปลี่ยนจากศูนย์มาเป็นค่าซึ่งขึ้นอยู่กับมวลสารต่อหน่วยเวลาของการไหล ความเร็วประกอบในทิศทางสัมผัส V_t แรงบิดที่เกิดขึ้นจะเขียนได้เป็น



ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

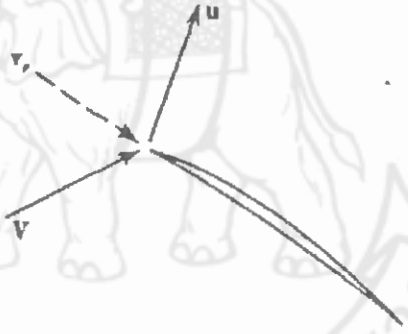
รูปที่ 2-9 การจัดใบจักรต่อเนื่องรอบของวงกลม

ถ้าพิจารณาชุดใบจักรอีกแบบหนึ่ง (รูปที่ **2-10**) ซึ่งหมุนภายในระบบใบจักรที่อยู่กับที่ด้วยความเร็วคงที่ ถ้าต้องการการทำงานที่มีประสิทธิภาพการไหลเข้าหาใบจักรที่เคลื่อนที่จะต้องมีการรบกวนต่อการหมุนน้อยที่สุด นั่นคือเข้าในทิศทางสัมผัส (รูปที่ **2-11**)



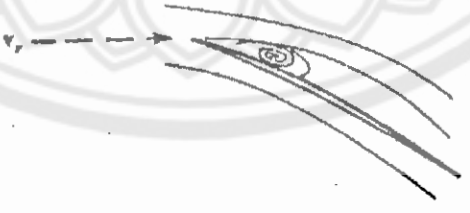
ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-10 กงจักรภายในหมุนรอบกงจักรภายนอกอยู่กับที่



ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-11 ความเร็วสัมพัทธ์ที่สัมผัสกับใบจักร



ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-12 การสูญเสียเนื่องจากการแยกตัวของการไหล
เพราะความเร็วเข้าไม่สัมผัสใบจักร

ถ้าความเร็วสัมพัทธ์ไม่สัมผัสกับใบจักรที่ทางเข้าจะทำให้เกิดการแยกตัว (รูปที่ **2-12**) และความสูญเสียจะเพิ่มพูนอย่างรวดเร็ว (ประมาณกำลังสอง) ตามมุมที่บ่ายเบนจากทิศทางสัมผัสอันทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องวลอลงอย่างมากมาย การแยกตัวอาจเกิดขึ้นได้แม้ความเร็วสัมพัทธ์ที่กระทบจะอยู่ในทิศทางสัมผัสทั้งนี้เนื่องจากความโค้งของใบจักรหรือการขยายตัวของการไหล ซึ่งทำให้ชั้นขอบเขตหนาขึ้นและหยุดนิ่งในที่สุด การสูญเสียเหล่านี้เรียกว่า ความสูญเสียเนื่องจากการกระแทกหรือการสูญเสียเนื่องจากการอลวน (Shock or turbulent losses) เมื่อของไหลออกจากชุดใบจักรต่อเนื่อง โดยทั่วไปความเร็วจะถูกเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์พลังพลของของไหล ซึ่งจะเกิดงานกระทำต่อใบจักรต่อเนื่องหรือมีงานกระทำต่อของไหลโดยใบจักรต่อเนื่อง

การออกแบบเครื่องกลของไหลต้องทำให้การจัดแบบและรูปลักษณะของทางไหลและใบจักร เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเฉพาะอาจขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของงานที่จะให้เครื่องทำ จำนวนงานที่ต้องการต่อหนึ่งหน่วยมวลสารของของไหลและความหนาแน่นของไหล

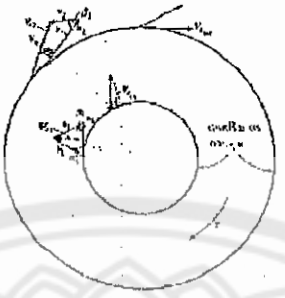
2.2.2 ทฤษฎีของเครื่องกลของไหล (Fluid machinery theory)

เครื่องปั่นดึงงานออกจากของไหล ในขณะที่เครื่องสูบ, เครื่องเป่าและเครื่องอัด เพิ่มพลังงานให้กับของไหลโดยผ่านกงจักร (Runner) ที่ประกอบด้วยใบจักรจัดอยู่รอบแกน เนื่องจากระยะทางที่ใบจักรเคลื่อนที่มีแต่ในทิศทางสัมผัส ดังนั้นงานจึงได้จากแรงประกอบในทิศทางสัมผัสกับระยะทางในทิศทางนั้น แรงในทิศทางรัศมีไม่มีงานเกิดขึ้น เนื่องจากไม่มีระยะทางเคลื่อนที่ในแนวรัศมี

ในการพิจารณาทฤษฎีของเครื่องกลของไหล ขณะนี้จะไม่นำเอาความผิดเข้ามาเกี่ยวข้องและสมมติให้การไหลเข้าไปอย่างเรียบร้อยนั้นคือ มีใบจักรจำนวนไม่จำกัดอันทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ของของไหลสัมผัสกับใบจักรเสมอ ก่อให้เกิดสมมาตรรอบวงกลม ซึ่งทำให้ใช้สมการของโมเมนต์ของพลังพลในการคำนวณได้ สำหรับการไหลคงตัวจะได้

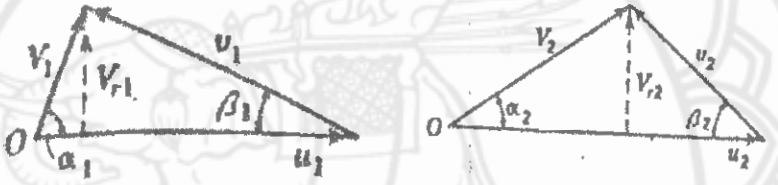
$$T = \rho Q[(rV_t)_{out} - (rV_t)_{in}] \qquad (2-14)$$

โดยที่ T คือแรงบิดที่กระทำต่อของไหลภายในปริมาตรกำหนด(รูปที่ **2-13**)และ $Q(rV_t)_{out}$ และ $Q(rV_t)_{in}$ คือ ค่าโมเมนต์ของพลังพลที่จากและเข้าปริมาตรกำหนดตามลำดับ



ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-13 การไหลคงตัวผ่านปริมาตรควบคุมที่สมมาตรรอบวงกลม



ทางออก ทางเข้า

ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-14 แผนภาพเวกเตอร์เชิงวง

ในการศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆ รอบความเร็วบนตัวใบจักรภาพเวกเตอร์เชิงวงมักจะใช้ประกอบ การพิจารณาโดยที่ใช้ 1 เป็นเลขกำกับของไหลที่เข้ามา และ 2 เป็นเลขกำกับของไหลที่ออกไป (รูปที่ **2-14**) V เป็นความเร็วจริงของของไหล u เป็นความเร็วที่ขอบนอกของกงจักร และ v เป็นความเร็วสัมพัทธ์ของของไหลกับกงจักรเริ่มความเร็วจริง v และ u จากจุด o แล้วต่อความเร็วสัมพัทธ์อย่างในรูป V_u เป็นความเร็วประกอบของความเร็วจริงในทิศทางสัมผัส α เป็นมุมที่ความเร็วจริง V ทำกับความเร็วที่ขอบนอก u และ β เป็นมุมที่ความเร็วสัมพันธ์กับ $-u$ หรือ**มุมของใบจักร ถ้าการไหลเข้าเป็นไปโดยสมบูรณ์** V_r **เป็นความเร็วประกอบของความเร็วจริงในทิศทางตั้งฉากกับขอบ ตามสัญลักษณ์ใหม่นี้สมการจะกลายเป็น**

$$\begin{aligned} T &= \rho Q(r_2 V_2 \cos\alpha_2 - r_1 V_1 \cos\alpha_1) \\ &= \rho Q(r_2 V_{u_2} - r_1 V_{u_1}) \end{aligned} \qquad (2-15)$$

ถ้าอัตราการไหลของมวลสารมีค่า $\rho Q = (Q)_{out} = (Q)_{in}$ ตามสมการข้างบน เมื่อ T มีค่าเป็นบวก ค่าโมเมนต์ของพลังพลของของไหลเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านปริมาตรกำหนดอย่างในเครื่องสูบ ถ้า T เป็นลบ ค่าโมเมนต์ของพลังพลของของไหลจะลดลงอย่างในเครื่องปั่น ถ้ามีค่าเป็น 0 อย่างการไหลที่ไม่มีใบจักรซึ่ง

$$rV_t = \text{ค่าคงที่}$$

อันเป็นการไหลคงที่ของกระแสวนแบบอิสระซึ่งความเร็วในทิศทางรัศมีแปรเป็นส่วนกลับกับรัศมี

2.2.3 เครื่องสูบ (Pumps)

เครื่องสูบเป็นเครื่องมือกลในการเพิ่มพลังงานให้กับของไหล สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือเครื่องสูบแรงเหวี่ยงซึ่งเป็นการไหลตามรัศมี เครื่องสูบแบบการไหลตามแกน และเครื่องสูบแบบผสม ดังนี้

2.2.3.1 เครื่องสูบแรงเหวี่ยง

เครื่องสูบแรงเหวี่ยง โดยทั่วไปอาจออกแบบให้ได้อัตราการไหลตั้งแต่ 4 ลิตร /นาที จนถึง 30 ลูกบาศก์เมตร / นาที โดยที่ส่งตั้งแต่ 1 เมตร จนถึงประมาณ 120 เมตร ในเครื่องขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพอาจสูงเกือบถึง 90 เปอร์เซ็นต์

ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

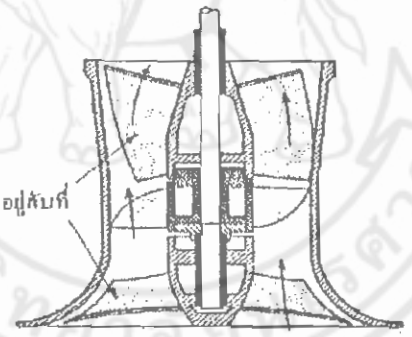
รูปที่ 2-15 สูบหอยโข่ง

เครื่องโดยทั่วไปประกอบด้วยกงจักรหมุนอยู่ในโครงรอบ (รูปที่ 2-15) กงจักรประกอบด้วยใบจักรจำนวนหนึ่งซึ่งโค้งกลับทิศทางของการหมุนใบกงจักรติดอยู่กับวงแกน (Shroud) ของไหลเข้าตรงส่วนกลางหรือตาของกงจักรกระทบใบจักร แล้วถูกเหวี่ยงตามทิศทางรัศมีของใบจักรออกรอบวงของโครงรอบ ระหว่างการไหลผ่านกงจักรของไหลได้รับพลังงานจากใบจักร ทำให้ความเร็วและความดันของการไหลเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ในของไหลขณะที่ออก

จากกงจักรเป็นพลังงานจลน์ ดังนั้นเพื่อไม่ให้เป็นการสูญเปล่าของพลังงานอันเป็นการลดประสิทธิภาพของเครื่องกล พลังงานจลน์ที่ออกมาจากใบจักรส่วนใหญ่จึงถูกแปลงออกเป็นพลังงานความดันแทน โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนรูปพลังงานแล้วนี้ทำได้โดยการออกแบบให้โครงรอบนี้เป็นรูปเกลียวโดยที่พื้นที่ภาคตัดของการไหลรอบขอบของกงจักรค่อย ๆ ขยายขึ้น ลักษณะโครงรอบนอกนี้คล้ายกับเปลือกหอยโข่ง ความเร็วภายในหอยโข่งนี้ซับซ้อน แต่พอจะประมาณได้กับการไหลของกระแสวนอิสระ ความเร็วจะถูกลดลงอีกตรงทางออกที่ขยายขนาดภาคตัดขึ้น ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานของความเร็วมาเป็นความดันมีประมาณ 40 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์

2.2.3.2 เครื่องสูบแบบไหลตามแกน

เครื่องสูบชนิดนี้เหมาสำหรับการไหลในอัตราสูง แต่ต้องการส่งขึ้นไม่สูงมากนัก ทำให้เหมาะสำหรับใช้งานชลประทาน งานระบายน้ำ และการสูบถ่ายน้ำเสีย ประสิทธิภาพของเครื่องสูบชนิดนี้พอ ๆ กับเครื่องสูบหอยโข่ง แต่เนื่องจากความเร็วสัมพัทธ์ของเครื่องค่อนข้างสูง ทำให้สามารถลดขนาดของเครื่องลงมา ทำให้เครื่องชุดนี้ราคาค่อนข้างถูก



ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-16 เครื่องสูบแบบไหลตามแกน

กงจักร (รูปที่ 2-16) เป็นชนิดเปิดลักษณะคล้ายใบจักรเรือ ของไหลเข้าตามแกนผ่านกงจักรซึ่งเพิ่มความเร็วเชิงมุมให้ ดังนั้นเส้นทางที่อนุภาคของไหลเคลื่อนที่ภายในจะมีรูปคล้ายเกลียวแหวนรูปทรงกระบอก ความสูงขับที่เพิ่มขึ้นได้จากการพัดหรือการยกของใบจักรโดยไม่มีแรงเหวี่ยงเข้ามาเกี่ยวข้อง หน้าที่ของใบนำ(guide blade) ซึ่งอยู่กับที่ก็คือการจำกัดให้การไหลอยู่ในทิศทางตามแกนและเปลี่ยนพลังงานความเร็วมาเป็นพลังงานความดัน

2.2.3.3 เครื่องสูบแบบผสม

เครื่องสูบแบบผสมเป็นเครื่องสูบที่อยู่ระหว่างกลางของเครื่องสูบหอยโข่งกับแบบการไหลตามแกนการไหลจะมีส่วนหนึ่งออกตามรัศมีกับอีกส่วนหนึ่งออกตามแกน โดยที่รูปร่างของกงจักรจะออกแบบมาตามนั้น เส้นทางที่อนุภาคของไหลเคลื่อนที่จะมีรูปเป็นเกลียวแหวนทรงกรวย ความสูงของการส่งประมาณ 25 เมตรต่อกงจักร ข้อดีที่สำคัญของเครื่องสูบชนิดนี้ที่ทำให้เหนือกว่าเครื่องสูบแบบการไหลตามแกนก็คือ กำลังงานที่ต้องการจากมอเตอร์จะเกือบคงที่ในกรณีที่ว่าระดับส่งจะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก การเปลี่ยนแปลงพลังงานความดันอาศัยตัวกระจาย (diffusser) (รูปที่ 2-17 ก) หรือโครงรอบรูปเกลียว (รูปที่ 2-17 ข) หรือทั้งสองอย่างในรูปแบบที่เหมาะสม

ก. ข.

ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-17 เครื่องสูบแบบผสม

2.2.3.4 เครื่องสูบแบบอื่น ๆ

ถ้าระดับสูงกว่า 60 เมตร เครื่องสูบที่ใช้มักจะเป็นเอนกชั้น (Multistage) กล่าวคือ เครื่องสูบชนิดนี้จะคล้ายกับเครื่องสูบชนิดเดียวกันต่อแบบอนุกรม เครื่องสูบแบบหลักมักจะได้แก่ สูบหอยโข่ง เครื่องสูบชนิดนี้บางเครื่องออกแบบให้ส่งน้ำได้สูงถึง 1200เมตร

เครื่องสูบแบบอเนกชั้น บางแบบออกแบบมาเพื่อให้สูบน้ำจากบ่อหรือหลุมที่มีขนาดเล็ก (ตั้งแต่ขนาด 150 มิลลิเมตรขึ้นไป) โดยที่บางแบบสามารถสูบน้ำได้มากกว่า 1 คิว จากระดับที่ลึกถึง 300 เมตร กงจักรโดยทั่วไปมักออกแบบให้เป็นแบบผสม เพื่อทำให้เครื่องมีขนาดเล็กได้ตามต้องการ

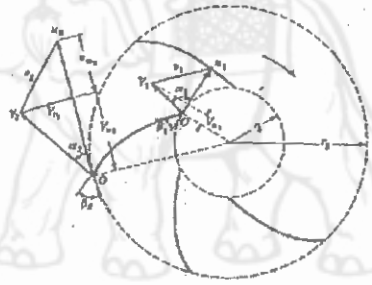
2.2.4 ผลจากมุมของใบจักรต่อการทำงานของเครื่องสูบ

มุมจาก β_2 ของใบจักรในกรณีของเครื่องสูบแบบเหวี่ยงยังผลต่อการทำงานของเครื่องสูบทั้งในรูปของระดับส่งที่ได้และกำลังงานที่ต้องการ พิจารณาภาพเวคเตอร์ทางออกของเครื่องสูบแบบเหวี่ยง (รูปที่ 2-18) จะได้

$$V_2 \cos\alpha_2 = V_{u_2} = u_2 - V_{r_2} \cot\beta_2 \qquad (2-16)$$

แทนค่า จะได้

$$H = \frac{u_2}{g}(u_2 - V_{r_2} \cot\beta_2) \qquad (2-17)$$



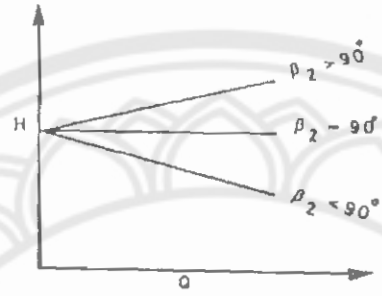
ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-18 ความเร็วตรงทางออกของสูบแบบเหวี่ยง

สำหรับใบหมุนและความเร็วรอบที่กำหนด ค่า β_2 และ u_2 เป็นค่าคงที่ และอัตราการไหล Q เท่ากับผลคูณของพื้นที่รอบนอก ($2\pi r_2 b_2$) และความเร็วเชิงรัศมี V_{r2} หรืออีกนัยหนึ่ง $Q=2\pi r_2 b_2 V_{r2}$ ซึ่งแทนค่าลงในสมการข้างบนแล้วจะได้

$$H = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2 Q^2 \cot\beta_2}{2\pi r_2 b_2 g} \qquad (2-18)$$

จะเห็นได้ว่าค่า H เปลี่ยนแปรเป็นเส้นตรงกับ Q (รูปที่ **2-19**) ส่วนอิทธิพลของมุมจากต่อความสัมพันธ์ จะได้จากการพิจารณาค่า $\cot \beta_2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าใบจักรโค้งไปข้างหน้า ($\beta_2 > 90^0$) ระดับส่งจะมากขึ้นตามอัตราการไหลที่สูงขึ้น ถ้าใบจักรโค้งกลับ($\beta_2 < 90^0$) ระดับส่งจะลดลงในขณะที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใบจักรตรง($\beta_2 = 90^0$) ค่า H จะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับอัตราการไหล



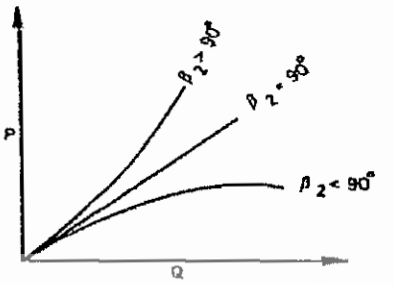
ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-19 อิทธิพลของมุมจากต่อความสัมพันธ์ของระดับกับอัตราการไหล

กำลังงานที่ต้องการ $P = \gamma QH$ ซึ่งถ้าแทนค่า H จากสมการ(2-16) จะได้

$$P = \gamma \frac{u_2^2}{g} Q - \gamma \frac{u_2 Q^2 \cot \beta_2}{2\pi r_2 b_2 g} \qquad (2-19)$$

จะเห็นได้ว่า P เปลี่ยนแปรเป็นกำลังสองกับ Q (รูปที่ **2-22**)จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ใบจักรโค้งไปข้างหน้า ($\beta_2 > 90^0$) ค่ากำลังงานที่ต้องการในการส่งน้ำที่อัตราสูงขึ้น จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาก อันเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาในการออกแบบ อีกประการหนึ่งความเร็วที่ตรงทางออกของใบจักรจะสูงมาก ทำให้เปลี่ยนเป็นความดันลำบากขึ้น จะเห็นว่าโดยทั่วไปมักจะออกแบบให้ใบจักรโค้งกลับ ($\beta_2 < 90^0$) โดยที่ ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบจริงจะตกอยู่ราว 20 ถึง 25 องศา



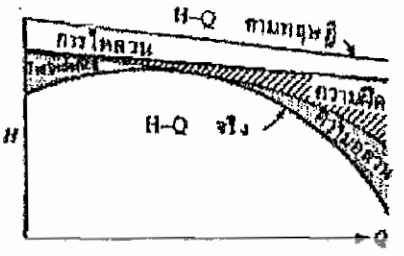
ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-20 อิทธิพลของมุมจากต่อความสัมพันธ์ของกำลังกับอัตราการไหล

2.2.5 การสูญเสียต่าง ๆ ของเครื่องสูบ

การสูญเสียของเครื่องสูบแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้สองประเภทคือ การสูญเสียเชิงชลศาสตร์และการสูญเสียเชิงกล

การสูญเสียเชิงชลศาสตร์ที่สำคัญก็มีจากความจริงที่ว่าใบจักรที่ใช้ในเครื่องสูบมีจำนวนแน่นอน การนำออกจึงไม่สมบูรณ์ ดังนั้นความเร็วสัมพัทธ์จริงของการไหลออกจึงมิได้ออกไปตามมุม β_2 ของใบจักร ของไหลจะดูเหมือนว่าอกจากใบจักรด้วยมุม β_2' ซึ่งมีค่าน้อยกว่า β_2 นอกจากนี้ยังมีผลจากการไหลเวียน (circulatory flow) อันทำให้ค่า V_{u2} น้อยลงจากความจริงผลจากความฝืดของการไหลระหว่างของไหลกับใบจักร และระหว่างของไหลกับโครงรอบของความสูญเสีย เนื่องจากความฝืดนี้เป็นสัดส่วนกำลังสองกับความเร็วของการไหล ท้ายที่สุดคือการสูญเสียเนื่องจากความอลวนของการไหล การสูญเสียนี้เนื่องมาจากความเร็วสัมพัทธ์ที่เข้ากระทบใบจักร ถ้าเครื่องสูบทำงานตรงตามที่ออกแบบไว้ความสูญเสียนี้จะต่ำที่สุด เพราะในการออกแบบจะพยายามให้การสูญเสียเนื่องจากการกระแทก ซึ่งก่อให้เกิดความอลวนต่ำหรือแทบไม่เกิดเลยอยู่แล้ว แต่เนื่องจากเครื่องสูบมักจะถูกใช้งานในสภาพอื่น ๆ ซึ่งมุมที่กระทบจะไม่เป็นไปตามที่ออกแบบ ความสูญเสียเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างระดับส่ง-อัตราไหล จากความสัมพัทธ์เส้นตรงมาเป็นความสัมพันธ์เส้นโค้งตามรูปที่ 2-21



ที่มา : กีรติ ลีวจนกุล, [2]

รูปที่ 2-21 ผลของความสูญเสียต่อการทำงานของเครื่องสูบ

ความสูญเสียเชิงกลของเครื่องสูบที่เกิดมักจะมาจากความฝืดระหว่างส่วนที่ต้องติดต่อกัน เป็นต้นว่าลูกปืน อันทำให้สมรรถภาพของเครื่องสูบลดลง นอกจากนี้เนื่องจากเครื่องสูบไม่สามารถออกมาให้ขนาดพอดีกันตลอด จำต้องมีช่องว่างระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ อันทำให้เกิดการรั่วไหลได้ ทำให้ประสิทธิภาพลดลงอีก

2.2.6 ประสิทธิภาพของเครื่องสูบ

ประสิทธิภาพรวม (overall efficiency) e ของเครื่องสูบคืออัตราส่วนของกำลังงานที่ได้กับกำลังงานที่ใช้ หรืออีกนัยหนึ่ง

$$e = \frac{\gamma QH}{P} \qquad (2-20)$$

โดยที่ P คือกำลังงานที่ใช้ผ่านแกนส่งกำลัง โดยทั่วไปประสิทธิภาพของเครื่องสูบจะตกอยู่ราว 80 เปอร์เซ็นต์ ดังที่ ความสูญเสียในเครื่องสูบมีเนื่องจาก ความสูญเสียเชิงกลและความสูญเสียเชิงปริมาตร ดังนั้นประสิทธิภาพจึงแยกออกได้เป็นประสิทธิภาพเชิงชลศาสตร์ ประสิทธิภาพเชิงกลและประสิทธิภาพเชิงปริมาตร ซึ่งประสิทธิภาพรวมคือผลคูณของประสิทธิภาพทั้งสาม จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพเชิงชลศาสตร์ของเครื่องสูบคืออัตราส่วนของระดับส่งจริง กับระดับส่งเชิงทฤษฎีหรือ

$$e_h = \frac{H_p}{H} \qquad (2-21)$$

TK
1081
ธ3918
2541

2 8 มี.ค. 2543

4340077

สำนักหอสมุด

สำหรับเครื่องขนาดใหญ่ e_h อาจสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์

ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร e_v คืออัตราส่วนของอัตราการไหลจริงที่ส่งออกได้กับผลบวกของอัตราการไหลจริงและอัตราการไหลที่สูญเสียไปหรือ

$$e_m = \frac{\gamma(Q+Q_L)H}{P} \qquad (2-22)$$

โดยที่ Q_L คืออัตราการรั่วไหล

สำหรับเครื่องสูบขนาดใหญ่และขนาดกลาง e_v มักจะมีค่ามากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ เสมอ

ประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องสูบคืออัตราส่วนของกำลังที่ควรได้กับกำลังที่ใช้ หรือ

$$e_v = \frac{Q}{Q+Q_L} \qquad (2-23)$$

โดยทั่วไปค่า e_m จะค่อนข้างสูงคืออยู่ราว 95 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นประสิทธิภาพรวม จึงเขียนได้ว่า

$$e = e_h e_m * e_v \qquad (2-24)$$