บทปฏิบัติการที่ 1

การสูญเสียแรงดันในท่อปิด
(Head Losses in Pipe)

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การสูญเสียแรงดันในท่อปิดเนื่องจากแรงเสียดทาน และการสูญเสียแรงดันในท่อปิดเนื่องจากอุปกรณ์ประกอบท่อ ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงการสูญเสียแรงดันของของเหลวในท่อปิดเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ

1. การสูญเสียแรงดันในท่อปิดเนื่องจากแรงเสียดทาน (Head Losses due to Friction)

วัตถุประสงค์

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหลกับการสูญเสียแรงดันเนื่องจากแรงเสียดทานของน้ำผ่านท่อเรียบ

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ชุดทดสอบความเสียดทานการไหลในท่อ (Fluid Friction Apparatus) ดังภาพที่ 1.1 และมาโนมิเตอร์ (Manometer) ดังภาพที่ 1.2

a) อุปกรณ์ทดสอบความเสียดทานการไหลในท่อ

บทปฏิบัติการที่ 2

การไหลพุ่งกระทบฉากกั้น

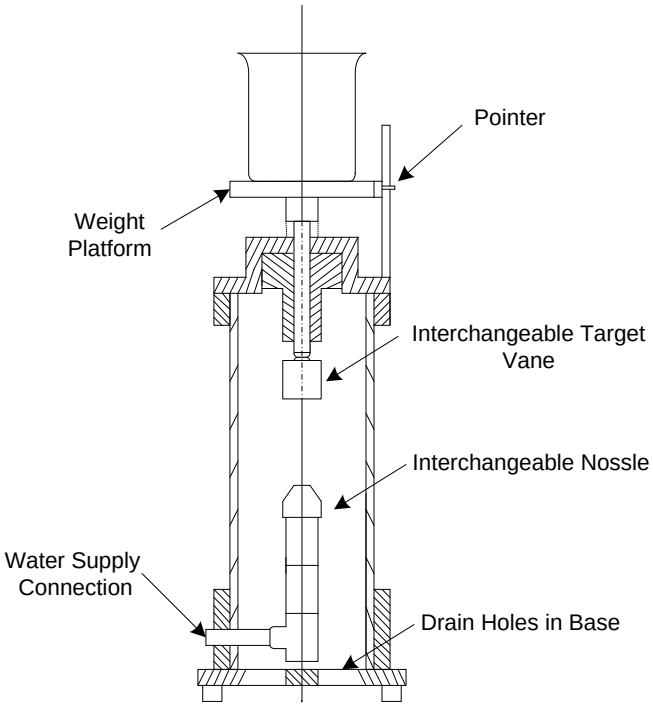
(Impact of Fluid Jets)

วัตถุประสงค์

ศึกษาแรงปฏิกิริยาอันเนื่องจากลำน้ำพุ่งชนฉากกั้นรูปแบบต่าง ๆ ค่าแรงนี้เป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการออกแบบเครื่องจักรทางชลศาสตร์อันได้แก่ Pelton Wheel หรือ Impulse Turbine

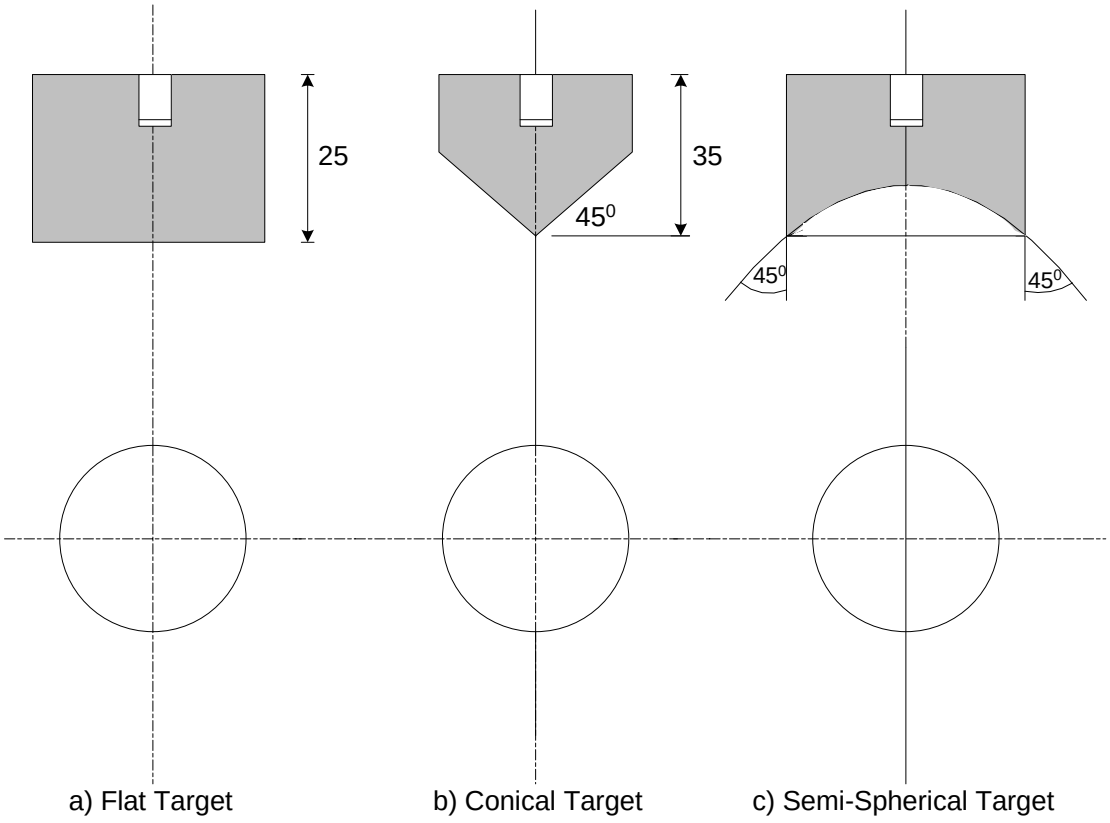
อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ชุดทดสอบการไหลพุ่งกระทบฉากกั้น (Impact of Jets Apparatus) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 Impact of Jets Apparatus

2) ฉากกั้นแบบแผ่นเรียบ (Flat Target) ฉากกั้นรูปทรงกรวย (Conical Target) และฉากกั้นครึ่งวงกลม (Semi-Spherical Target) ดังภาพที่ 2.2

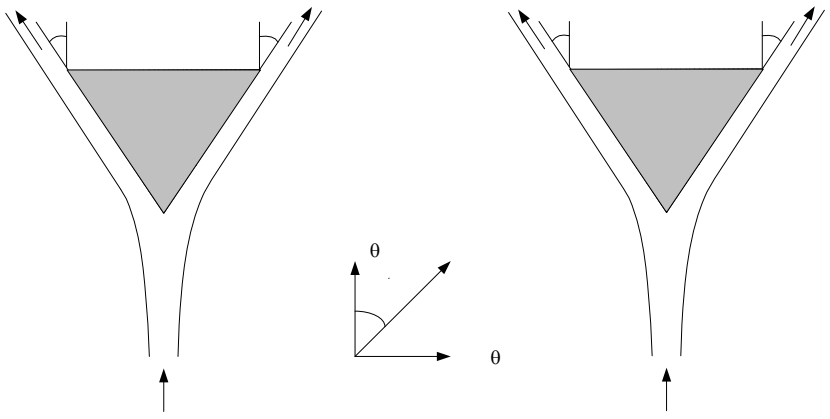


ภาพที่ 2.2 Interchangeable Target Vanes

3) นาฬิกาจับเวลา

ทฤษฎี

เมื่อลำน้ำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่มากระทบกับผิวของน้ำแข็ง ลำน้ำจะสะท้อน และไหลไปตามพื้นผิวนั้น ถ้าถือว่าไม่มีแรงเสียดทานในขณะลำน้ำเคลื่อนที่ และไม่มีการสูญเสียพลังงานในขณะที่ลำน้ำพุ่งชน แรงดันน้ำที่กระทบผิวจะมีทิศทางตั้งฉากกับผิวกระทบ



ภาพที่ 2.3 Impact of Jet

จากภาพที่ 2.3 ลำน้ำพุ่งกระทบฉากกั้นทำให้ลำน้ำเปลี่ยนทิศทางด้วยมุม θ ถ้าถือว่าไม่เกิดแรงเสียดทานใด ๆ ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านฉากกั้นจะเท่ากับความเร็วเริ่มต้นที่กระทบฉากกั้น (v_i) แรงที่กระทำต่อฉากกั้นอันเนื่องมาจากลำน้ำพุ่งกระทบ จะเท่ากับแรงที่ทำให้น้ำเปลี่ยนทิศทาง จากกฎข้อ 2 ของนิวตัน

$$\text{Force} = \text{Mass} \times \text{Acceleration}$$

$$= \text{Nass Flow Rate} \times \text{Change in velocity}$$

$$F = M\Delta v$$

$$= M(v_i - v_i\cos\theta) \qquad \text{----------(2.1)}$$

โดยที่ $M = \rho Q$

และ ρ = ความหนาแน่นมวลของของไหล

ดังนั้น $F = \rho Q v_i (1-\cos\theta)$ ----------(2.2)

ค่า $\rho Q v_i$ เรียกว่า Incident Momentum ถ้าหารสมการ 2.2 ด้วยค่า $\rho Q v_i$ จะได้

$$\frac{F}{\rho Q v_i} = 1 - \cos\theta \qquad \text{----------(2.3)}$$

ในกรณีที่สมมุติให้ไม่มีการกระเด็นของน้ำขณะพุ่งกระทบฉากกั้น ดังนั้นแนวน้ำที่เปลี่ยนทิศไปจะขนานกับมุมเดิมของฉากกั้น

การคำนวณความเร็วต้น (v_i) ความเร็วของน้ำสามารถหาได้จากการวัดอัตราการไหล (Flow Rate) และหาพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด (Nozzle) โดย

$$v_n = \frac{Q}{A} \qquad \text{----------(2.4)}$$

แต่ถ้าหัวฉีดอยู่ต่ำกว่าฉากกั้น ความเร็วน้ำกระทบฉาก (v_i) จะน้อยกว่าความเร็วน้ำที่หัวฉีด (v_n) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์ การคำนวณค่า v_i สามารถหาได้จาก

$$v_i^2 = v_i^2 - 2gh \qquad \text{----------(2.5)}$$

โดย h = ระยะที่ฉากกั้นสูงกว่าหัวฉีด

g = ค่าแรงโน้มถ่วง

- แรงกระแทกสำหรับฉากกั้นแบบแผ่นเรียบ $\theta = 90^{\circ}$

ดังนั้น $\cos\theta = 0$

$$\frac{F}{\rho Q v_i} = 1 - \cos\theta = 1 \qquad \text{----------(2.6)}$$

- แรงกระแทกสำหรับฉากกั้นรูปกรวย $\theta = 45^{\circ}$

ดังนั้น $\cos\theta = 0.7071$

$$\frac{F}{\rho Q v_i} = 1 - \cos\theta = 0.2929 \qquad \text{----------(2.7)}$$

- แรงกระแทกสำหรับฉากกั้นรูปครึ่งวงกลม $\theta = 135^{\circ}$

ดังนั้น $\cos\theta = -0.7071$

$$\frac{F}{\rho Q v_i} = 1 - \cos\theta = 1.7071 \qquad \text{----------(2.8)}$$

วิธีการทดลอง

1) ติดตั้งฉากกั้นเข้าไปในชุดทดลอง โดยเริ่มจากฉากกั้นแบบแผ่นเรียบ

2) ตั้งเข็มชี้บอกตำแหน่งของแป้นรองรับน้ำหนักเพื่อกำหนดไว้เป็นจุดเริ่มต้น

3) นำตุ้มน้ำหนักโดยเริ่มต้นที่ขนาด 100 กรัม วางลงบนแป้นรองรับ น้ำหนักจะกดสปริงทำให้แป้นรองรับยุบตัวลง

4) เปิดน้ำผ่านหัวฉีดให้พุ่งเข้าสู่ฉากกั้น ปรับปริมาณน้ำจนกระทั่งแป้นรองรับน้ำหนักถูกน้ำดันเลื่อนตัวขึ้นไปจนอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น โดยดูจากเข็มชี้บอกตำแหน่งในข้อ 2)

5) วัดอัตราการไหลที่ปรับได้ในข้อ 4) โดยใช้วิธีการวัดปริมาตรและจับเวลา บันทึกข้อมูลอัตราการไหลและน้ำหนักที่วางบนแป้นรองรับลงในตารางที่ 2.1

6) เพิ่มตุ้มน้ำหนักลงบนแผ่นรองรับไปเรื่อย ๆ และทำการทดลองซ้ำตามข้อ 4) และข้อ 5) ในแต่ละครั้งที่เพิ่มน้ำหนักทำการบันทึกผลข้อมูลอัตราการไหลและน้ำหนักที่วางบนแป้นรองรับ ทำการทดลองให้ได้ข้อมูลอย่างน้อย 7 ค่าขึ้นไป

7) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1)-6) โดยใช้ฉากกั้นรูปกรวยและรูปครึ่งวงกลม

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองการไหลพุ่งกระทบฉากกั้นแบบแผ่นเรียบ

Nozzle Diameter (mm) : _____Type of Target : _____

Water Temperature (^{o}C) : _____Water Density (kg/m^3) : _____

Results	Number						
	1	2	3	4	5	6	7
Total weight on carrier (kg)							
Quantity of water collect (liters)							
Time to collect water (sec)							
Volumetric flow rate, Q (litre/sec)							
Nozzle velocity, v_n (m/s)							
Height of target above nozzle h(mm.)							
Impact velocity, v_i (m/s)							
Impact force (N)							
Incident momentum (rQv_i)							

Slope $\frac{F}{\rho Q v_i}$ = _____

ตารางที่ 2.2 ผลการทดลองการไหลพุ่งกระทบฉากกั้นรูปทรงกรวย

Nozzle Diameter (mm) : _____Type of Target : _____

Water Temperature (^{o}C) : _____Water Density (kg/m^{3}) : _____

Results	Number						
	1	2	3	4	5	6	7
Total weight on carrier (kg)							
Quantity of water collect (liters)							
Time to collect water (sec)							
Volumetric flow rate, Q (litre/sec)							
Nozzle velocity, v_n (m/s)							
Height of target above nozzle h(mm.)							
Impact velocity, v_i (m/s)							
Impact force (N)							
Incident momentum (rQv_i)							

Slope $\frac{F}{\rho Q v_i}$ = _____

ตารางที่ 2.3 ผลการทดลองการไหลพุ่งกระทบฉากกั้นรูปครึ่งวงกลม

Nozzle Diameter (mm) : _____Type of Target : _____

Water Temperature (^{o}C) : _____Water Density (kg/m^{3}) : _____

Results	Number						
	1	2	3	4	5	6	7
Total weight on carrier (kg)							
Quantity of water collect (liters)							
Time to collect water (sec)							
Volumetric flow rate, Q (litre/sec)							
Nozzle velocity, v_n (m/s)							
Height of target above nozzle h(mm.)							
Impact velocity, v_i (m/s)							
Impact force (N)							
Incident momentum (rQv_i)							

Slope $\frac{F}{\rho Q v_i}$ = _____

วิเคราะห์ผลการทดลอง

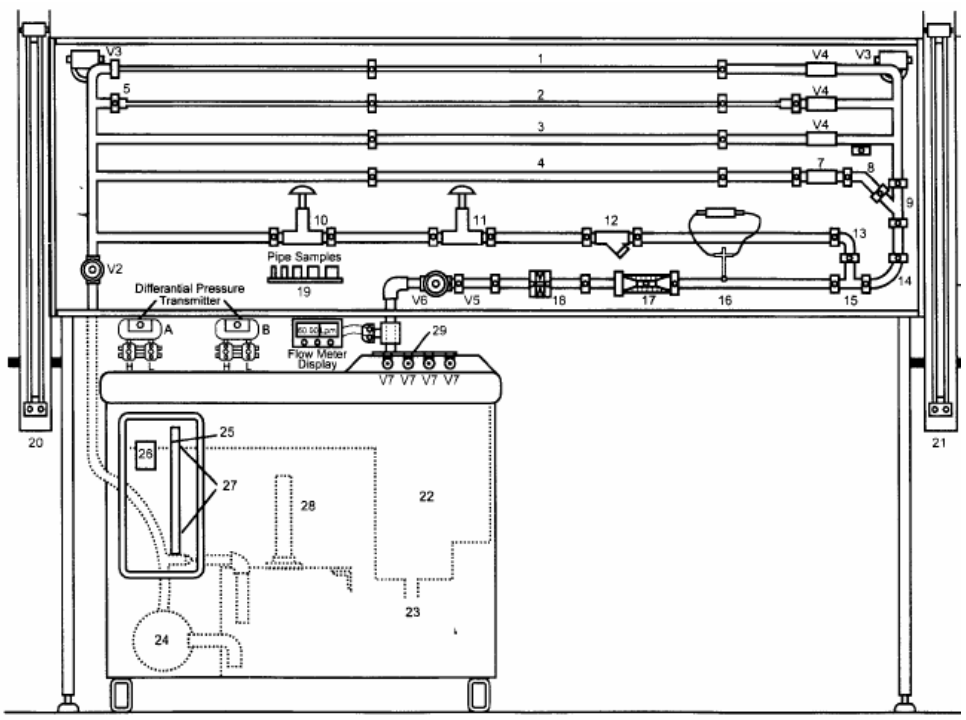
1) คำนวณค่าอัตราการไหล (Flow Rate) และความเร็วน้ำที่ออกจากหัวฉีดของทุกผลการทดลอง แล้วคำนวณความเร็วน้ำที่กระทบฉากกั้น (v_i) โดยสมการที่ 2.4

2) คำนวณค่า Impact Momentum ($\rho Q v_i$) แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง F กับ Impact Momentum จากนั้นหาค่า Slope ของกราฟแต่ละเส้น (ขึ้นอยู่กับชนิดฉากกั้น) เพื่อเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากสมการ 2.5, 2.6 และ 2.7 คือ 1, 0.2929 และ 1.7071 สำหรับฉากกั้นแบบแผ่นเรียบ ฉากกั้นรูปทรงกรวย และฉากกั้นครึ่งวงกลม ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

โครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2549. **คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ EGCE 322 Hydraulic Engineering Laboratory**.

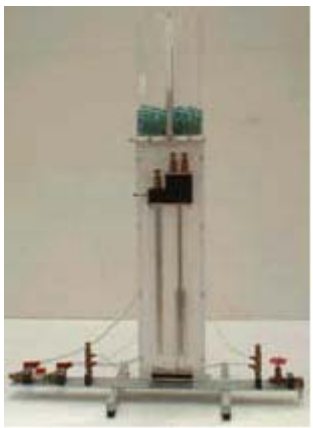
Essom Company Limited. 1999. **Technical Training Equipment.**



1 Smooth Boor Pipe	7 Ball Valve	13 Elbow 90°	20 Mercury Manometer
2 Smooth Boor Pipe	8 Elbow 45°	14 Bend 90°	21 Water Manometer
3 Roughened Pipe	9 Y-Connection	15 T-Connection 90°	22 Volumetric Flow
4 Smooth Boor Pipe	10 Gate Valve	16 Pitot Tube	Measuring Tank
5 Contraction	11 Globe Valve	17 Venturi Meter	25 Volume Indicator
6 Expansion	12 In-line Strainer	18 Orifice Meter	29 Dump Valve

b) แผนผังการจัดเครื่องมือทดสอบ

ภาพที่ 1.1 ชุดทดสอบความเสียดทานการไหลในท่อ



ภาพที่ 1.2 มาโนมิเตอร์

2) นาฬิกาจับเวลา

3) เวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ (Vernier Caliper)

ทฤษฎี

การไหลของน้ำในท่อจะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของเหลวและเนื่องจากแรงหนืดของของเหลวเอง การสูญเสียแรงดัน (Head Loss) จะสามารถเขียนเป็นสมการซึ่งเรียกว่า สมการของ Darcy-Weisbach ได้ดังนี้

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} \qquad \text{----------(1.1)}$$

เมื่อ

f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor)
L = ความยาวท่อ
D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
v = ความเร็วของการไหลเฉลี่ยผ่านท่อ
g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 m/s^2

ในการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ค่า f จะมีค่าดังนี้

$$f = \frac{64}{Re} \qquad \text{----------(1.2)}$$

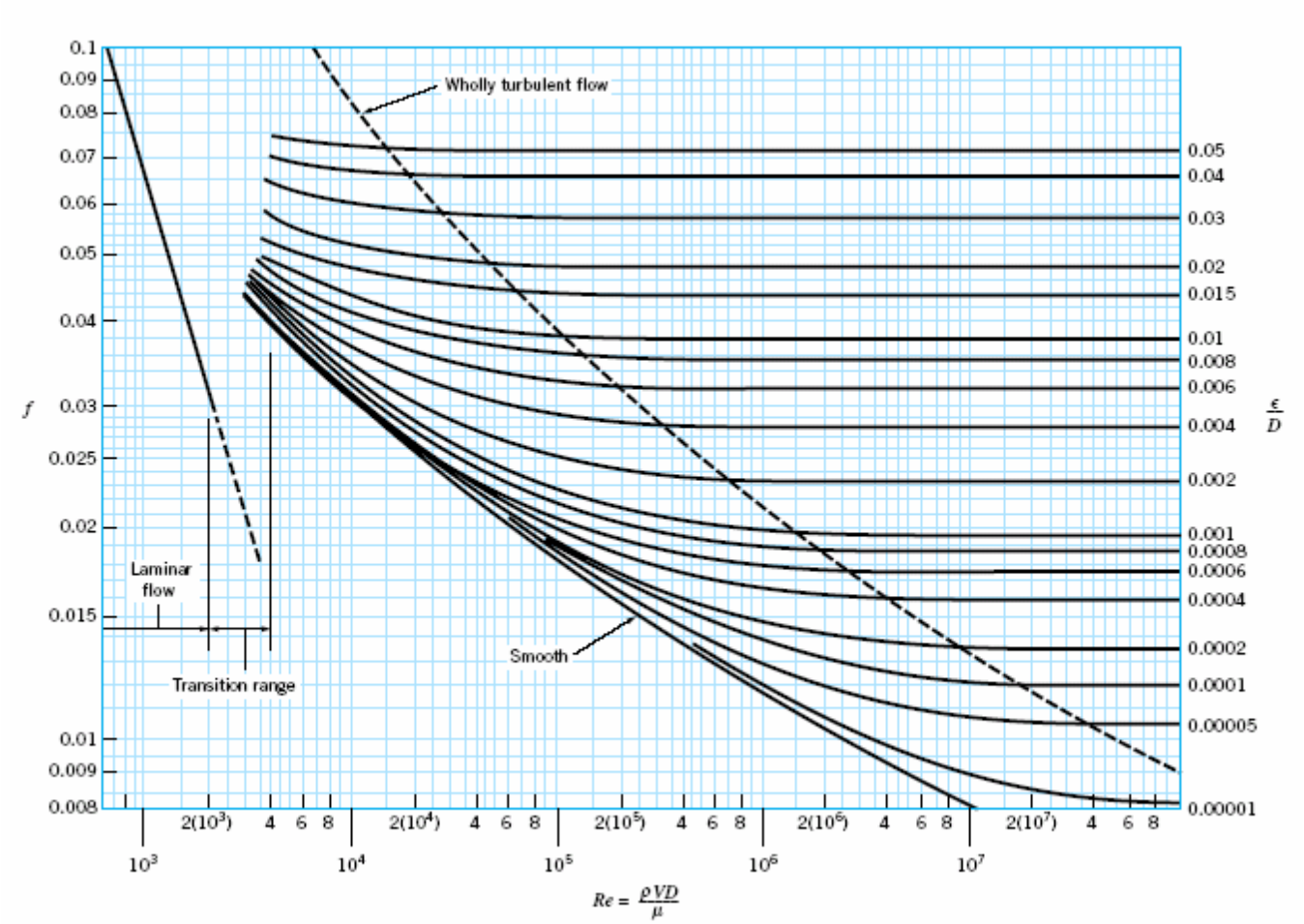
เมื่อ Re = Reynolds Number

ในการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ค่า f อาจจะประมาณได้ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left[\frac{e}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right] \qquad \text{----------(1.3)}$$

เมื่อ e/D = Relative Roughness

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor), Reynolds Number และ Relative Roughness สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภูมิเรียกว่า Moody Diagram ดังภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 Moody Diagram

ค่า Reynolds Number นี้สามารถหาได้จาก

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \qquad \text{----------(1.4)}$$

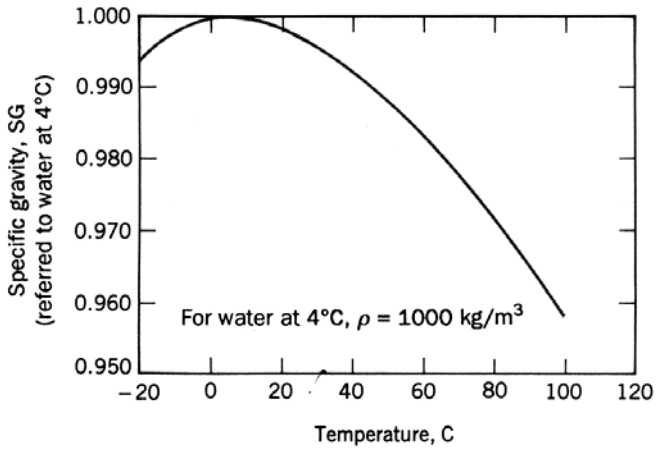
เมื่อ

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (Water Density) ตามภาพที่ 1.4

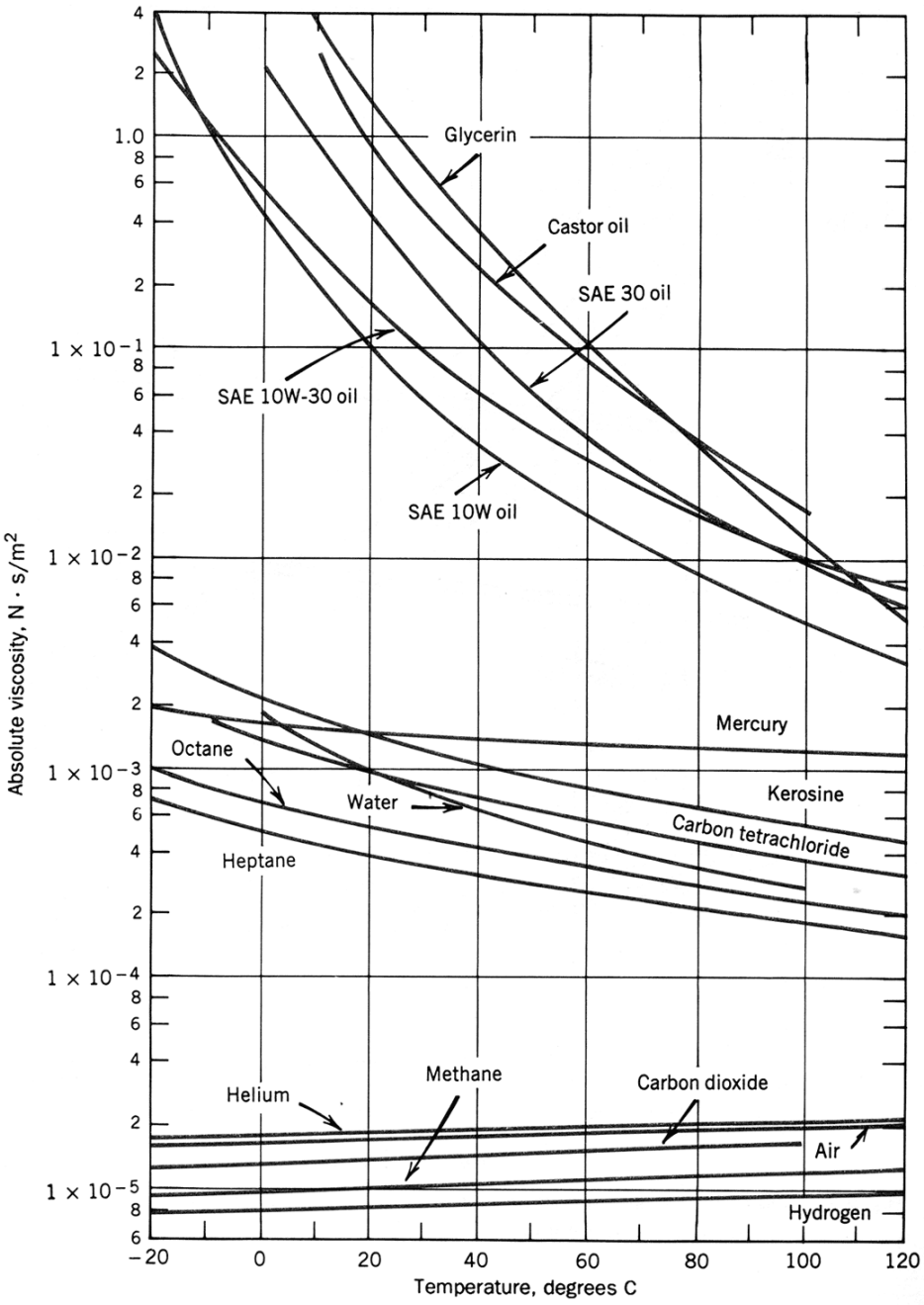
= 997 kg/m^3 ที่อุณหภูมิ 25°C

μ = ความหนืดของน้ำ (Absolute Dynamic Viscosity)

= 8.94x10^{-4} Ns/m^2 ที่อุณหภูมิ 25°C ตามภาพที่ 1.5



ภาพที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับอุณหภูมิของน้ำ



ภาพที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของของเหลวต่าง ๆ

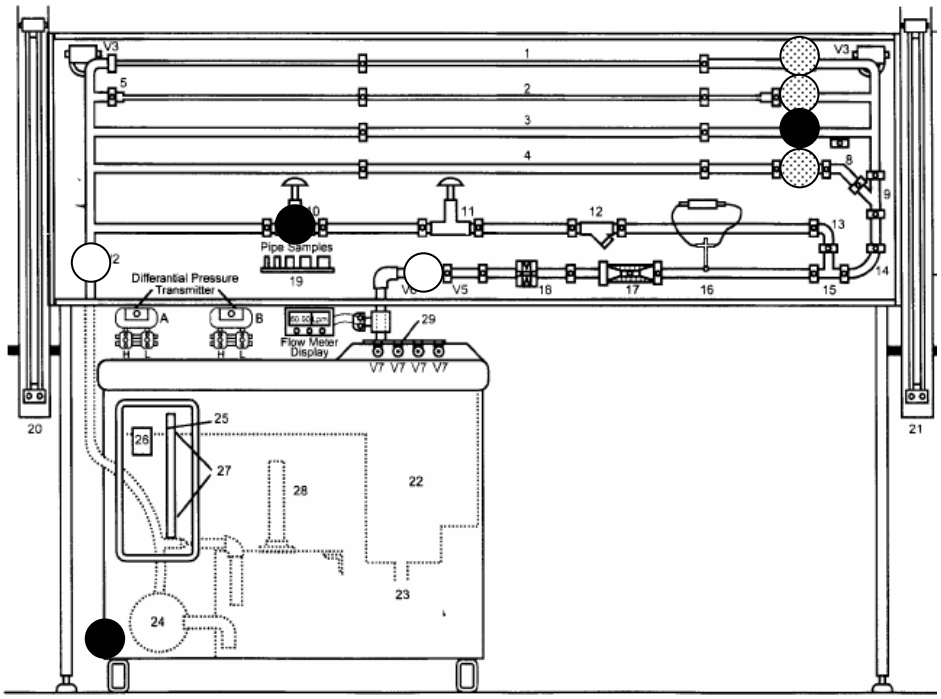
ค่า Reynolds Number ใช้จำแนกชนิดการไหลออกเป็น 3 ชนิดดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ชนิดของการไหลกับ Reynolds Number

ชนิดการไหล	Reynolds Number
1. Laminar Flow	< 2,000
2. Transition	> 4,000
3. Turbulent Flow	>> 4,000

วิธีการทดลอง

1) จัดเครื่องมือตามภาพที่ 1.6 เปิดและปิดวาล์วตามความเหมาะสม



ภาพที่ 1.6 ผังการจัดเครื่องมือทดสอบการสูญเสียแรงดันในท่อปิด

2) วัดอัตราการไหลโดยปิดวาล์ว 29 ปล่อยให้น้ำขังใน Volumetric Flow Measuring Tank (22) เริ่มจับเวลาเมื่อน้ำผ่านขีด 0 อ่านค่าเวลาเมื่อน้ำมีปริมาตรที่ต้องการ (เช่นถึง 10 ลิตร)

3) อ่านค่าการสูญเสียแรงดัน (Head Loss) ระหว่างจุดทดสอบ 2 จุดบนท่อทดสอบที่ 1, 2, 3 หรือ 4 โดยใช้มาโนมิเตอร์แบบปรอทหรือน้ำตามความเหมาะสม

4) ทดลองที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ช่วง ซึ่งครอบคลุมถึงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ถึงช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

5) วัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อแต่ละท่อด้วยเวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ และวัดระยะห่างระหว่างจุดทดสอบ

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 1.2 ผลการทดลองการสูญเสียแรงดันในท่อปิด

ท่อหมายเลข :_____

ความยาวท่อ :_____

Volume V (litre)	Time t (sec)	Flow Rate Q (m^3/s)	Pipe Diameter d (m)	Velocity v (m/s)	Reynolds Number Re

Friction Factor f	Type of Flow	Calculated Head Loss h_{cal} (mH_2O)	Measured Head Loss, h_{mea}	
			mmHg	mH_2O

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) ให้เปรียบเทียบค่าการสูญเสียแรงดันที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่วัดได้โดยตรงจากมาโนมิเตอร์ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด และมีค่าความแตกต่างกันอย่างไรที่ระดับการไหลแตกต่างกัน

2) พล๊อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหลยกกำลังสอง (v^2) กับค่าการสูญเสียแรงดันที่วัดได้ (h_{mea}) และที่ได้จากการคำนวณ (h_{cal}) แนวโน้มของกราฟเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่ อย่างไร

2. การสูญเสียแรงดันในท่อปิดเนื่องจากอุปกรณ์ประกอบท่อ (Head Losses due to Pipe Fittings)

วัตถุประสงค์

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหลกับการสูญเสียแรงดันเมื่อน้ำไหลผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ

อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วย ชุดทดสอบความเสียดทานการไหลในท่อ มาโนมิเตอร์ นาฬิกาจับเวลา และเวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ ตามรายละเอียดที่แสดงไว้ข้างต้น

ทฤษฎี

การไหลของของเหลวผ่านอุปกรณ์ประกอบท่อต่าง ๆ (Pipe Fittings) จะมีการสูญเสียพลังงานอยู่ด้วยเสมอ โดยปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปซึ่งวัดได้ในรูปของการสูญเสียแรงดัน (Head Loss) จะเป็นอัตราส่วนกับความเร็วของของไหลดังสมการ

$$h_f = K\frac{v^2}{2g} = Kh_v \qquad \text{----------(1.5)}$$

เมื่อ

K = Fitting Factor/Loss Coefficient เป็นค่าเฉพาะสำหรับอุปกรณ์ใด ๆ หาได้จากการทดลอง

h_v = Velocity Head = $\frac{v^2}{2g}$

นอกจากนี้การสูญเสียแรงดันยังสามารถเขียนได้ในรูป

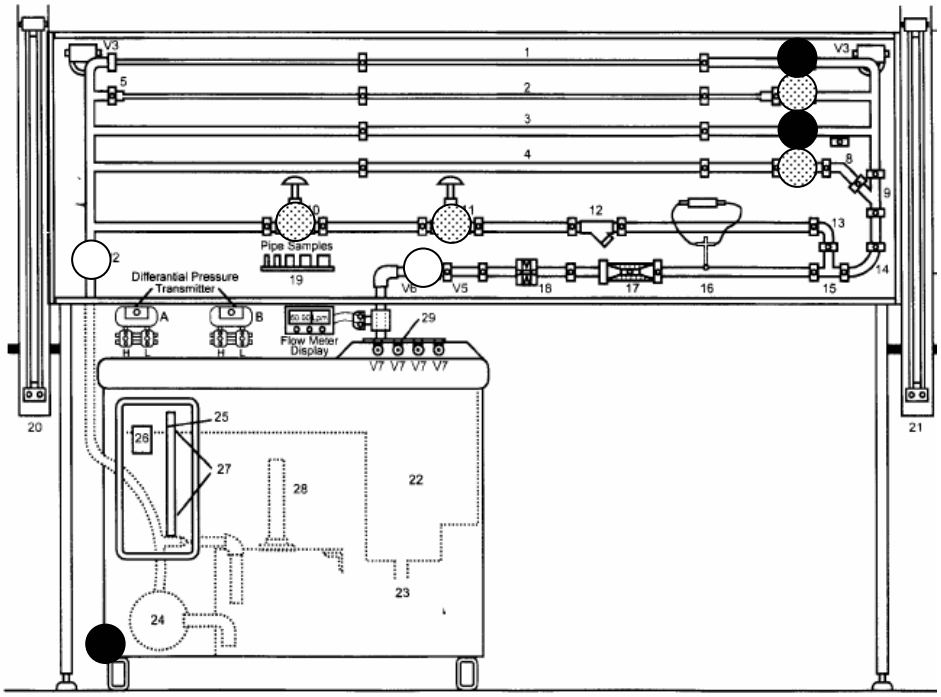
$$h_f = f\frac{L_e}{D}\frac{v^2}{2g} = f\frac{L_e}{D}h_v \qquad \text{----------(1.6)}$$

เมื่อ

L_e = ความยาวเทียบเท่าของท่อตรง (Equivalent Length)

วิธีการทดลอง

1) จัดเครื่องมือตามภาพที่ 1.7 เปิดและปิดวาล์วตามความเหมาะสมเพื่อให้ได้น้ำไหลผ่านอุปกรณ์ที่ต้องการ



ภาพที่ 1.7 ผังการจัดเครื่องมือทดสอบการสูญเสียแรงดันในท่อปิด

2) อ่านค่าการสูญเสียแรงดัน (Head Loss) ระหว่างจุดทดสอบ 2 จุดบนเครื่องมือแต่ละชนิดโดยใช้มาโนมิเตอร์แบบปรอทหรือน้ำตามความเหมาะสม

3) ทดลองที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ช่วงในแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งครอบคลุมถึงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ถึงช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 1.3 ผลการทดลองการสูญเสียแรงดันในท่อปิด

ท่อหมายเลข :_____

ชนิดของอุปกรณ์ :_____

Volume V (litre)	Time t (sec)	Flow Rate Q (m^3/s)	Pipe Diameter d (m)	Velocity v (m/s)	Velocity Head h_v (mH_2O)

Measured Head Loss, h_{mea}		K	Reynolds Number Re	Flow Type	f	L_e (m)
mmHg	mH_2O					

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) ให้สังเกตว่าค่า K และ Le สำหรับข้อต่อมีค่าคงที่หรือเปลี่ยนแปลงอย่างไรกับอัตราการไหล

2) พล๊อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{v^2}{2g}$ กับค่าการสูญเสียแรงดันที่วัดได้ (h_{mea}) แนวโน้มของกราฟเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่อย่างไร ให้หาค่าความชันของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดทั้งสามได้ใกล้เคียงที่สุด (Linear Regression Line) ความชันนี้คือค่า K เฉลี่ย

เอกสารอ้างอิง

Essom Company Limited. 1999. **Technical Training Equipment**.

บทปฏิบัติการที่ 3

การไหลลอดประตูระบายน้ำและไฮดรอลิกจั๊ม

(Flow under Sluice Gate and Hydraulic Jump)

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลของน้ำลอดใต้บานประตูระบายน้ำชนิดตรงและศึกษาถึงลักษณะการเกิดไฮดรอลิกจั๊ม (Hydraulic Jump) รวมถึงการศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) รางน้ำเปิดรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

2) สูบน้ำสำหรับทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำขั้นในระบบ

3) ประตูระบายน้ำและฝายสันมน ตามภาพที่ 3.1

ภาพที่ 3.1 ฝายสันมน (Ogee Weir)

4) เครื่องมือวัดความลึก (Depth Gage)

5) ถังตวงน้ำบนตาชั่ง

6) นาฬิกา

7) ไม้บรรทัด

ทฤษฎี

1. สมการที่เกี่ยวข้องในการไหลของน้ำในทางเปิด (Open Channel Flow)

- สมการต่อเนื่อง (Continuity Equation)

การเคลื่อนที่ของมวลในกรณีที่เป็นของเหลวประเภทอัดตัวยากเป็นไปตามสมการ

$\rho Av =$ ค่าคงที่ หรือ ----------(3.1)

$(\rho Av)_1 = (\rho Av)_2$ ----------(3.2)

$(Av)_1 = (Av)_2$ เมื่อ ρ คงที่ ----------(3.3)

หรือ $Q_1 = Q_2$ ----------(3.4)

สมการที่ 3.4 เรียกว่าสมการอัตราการไหลของปริมาตร (Volume Flow Rate Equation)

โดยที่

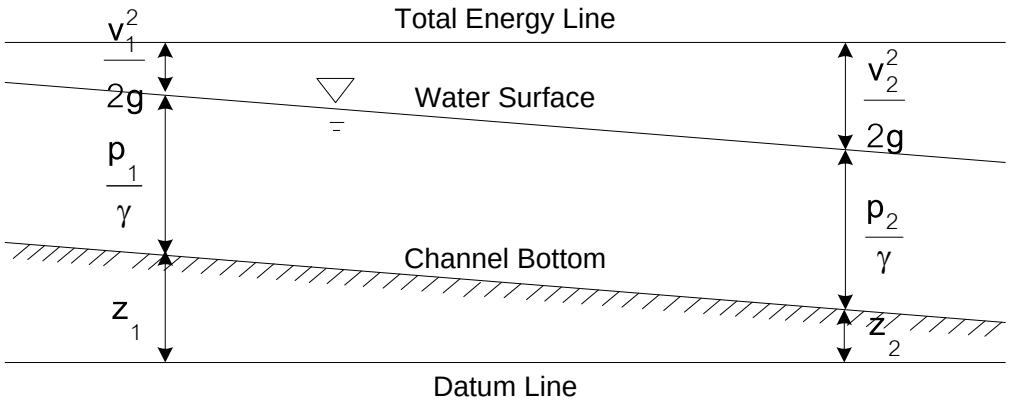
A_1, A_2 = พื้นที่หน้าตัดของการไหลตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

v_1, v_2 = ความเร็วของการไหลที่หน้าตัด 1 และ 2 ตามลำดับ

- สมการเบอร์นูลี่ (Bernulli's Equation)

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad \text{----------(3.5)}$$

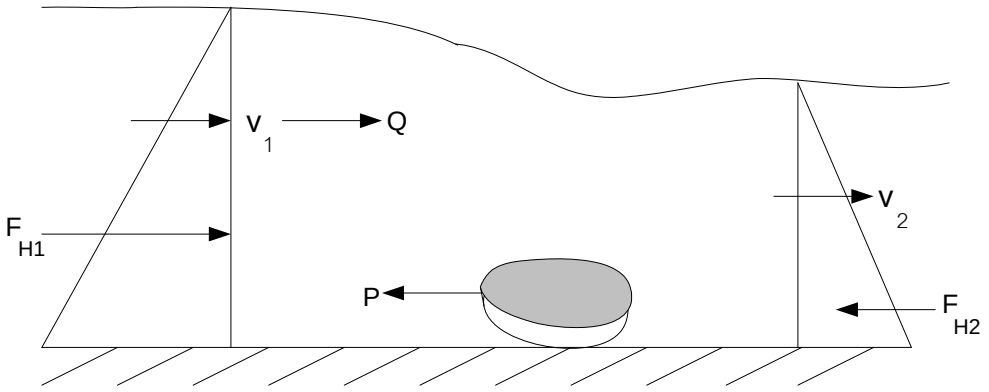
เทอมต่าง ๆ ตามสมการที่ 3.5 แสดงไว้ตามภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 เทอมต่างๆ ในสมการพลังงานของทางน้ำเปิด

- สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

สำหรับการไหลในทางน้ำเปิด สมการโมเมนตัมสามารถเขียนอธิบายตามภาพที่ 3.3 ดังนี้



ภาพที่ 3.3 ไดอะแกรมอิสระ (Free Body Diagram) ของการไหลในทางน้ำเปิด

$$\sum Fx = \rho Q(v_{x2} - v_{x1}) \qquad \text{----------(3.6)}$$

เมื่อ

$\sum Fx$ = ผลรวมของแรงกระทำทั้งหมดในทิศทาง X

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

Q = อัตราการไหลของปริมาตร

v_{x2} = ความเร็วของการไหลในทิศทาง X ตรงจุด 2

v_{x1} = ความเร็วของการไหลในทิศทาง X ตรงจุด 1

2. พลังงานจำเพาะ (Specific Energy)

หมายถึงพลังงานของการไหลของของไหลภายในทางน้ำเปิดโดยถือระดับอ้างอิงอยู่ที่บริเวณท้องทางน้ำเปิดนั้น ใช้สัญญาลักษณ์ E เขียนเป็นสูตรเป็น

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \qquad \text{----------(3.7)}$$

เมื่อ

E = พลังงานจำเพาะ ณ บริเวณหน้าตัดใด ๆ ที่พิจารณา
y = ความลึกของการไหล ณ ตำแหน่งที่พิจารณา
v = ความเร็วเฉลี่ย

หรือเขียนอยู่ในเทอมของอัตรการไหล (Q) ได้เป็น

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \qquad \text{----------(3.8)}$$

กรณีทางน้ำเปิดมีรูปตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีรูปความกว้างก้นคลอง = b และความลึก = y และถ้าให้ q = อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (= Q/b)

ในที่นี้ $A = b.y$

จาก $Q = Av = b.y.v$

$\therefore$ $q = b.y.\frac{v}{b} = v.y$

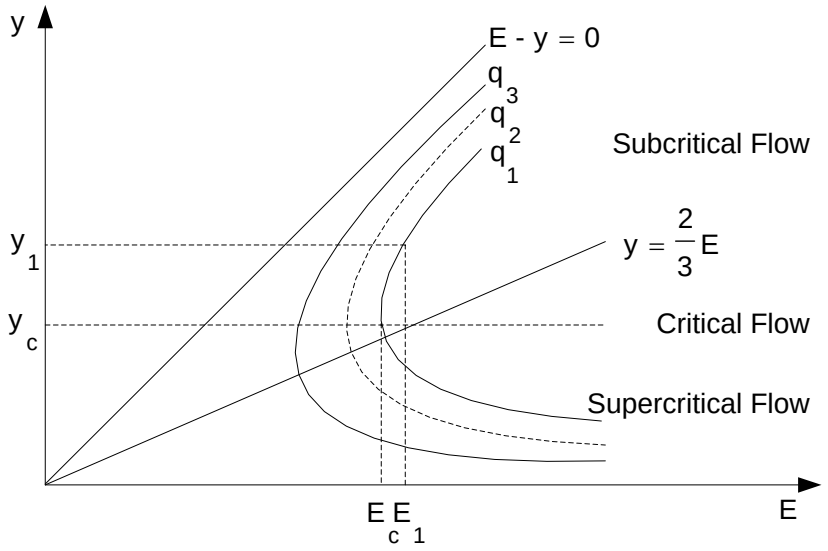
หรือ $v = \frac{q}{y}$ แทนค่าลงในสมการ 3.7 จะได้

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \qquad \text{----------(3.9)}$$

สมการที่ 3.9 เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจำเพาะกับค่าความลึดในการไหลของทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อจัดรูปสมการใหม่เป็น

$$(E - y)y^2 = \frac{q^2}{2g} \qquad \text{----------(3.10)}$$

เมื่อนำสมการที่ 3.10 ไปพล๊อตโดยให้แกน X เป็นค่า E และแกน Y คือค่าความลึกจะได้กราฟออกมาตามภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 โค้งพลังงานจำเพาะ

จากภาพที่ 3.4 จะเห็นว่าที่ q ใด ๆ ค่าหนึ่งและพลังงานจำเพาะค่าหนึ่งจะให้ค่า y หรือความลึกที่เป็นจริงได้ 2 ค่าเรียกค่า ความลึกดังกล่าวว่าความลึกทดแทน (Alternated Depth) เมื่อพิจารณารูปกราฟต่อไปจะพบว่าในแต่ละกราฟของแต่ละค่า q จะให้ค่า E ต่ำสุดอยู่ค่าหนึ่ง การไหลในขณะที่ให้ค่า E ต่ำสุดนี้เรียกว่า การไหลในภาวะวิกฤติ (Critical Flow) และความลึกในขณะที่การไหลเป็นแบบวิกฤตินี้เรียกว่า ความลึกวิกฤติ (Critical Depth) และจากกราฟทำให้สามารถแบ่งสภาพการไหลออกได้เป็น

เมื่อใดก็ตามที่สภาพการไหลในทางน้ำเปิดที่ค่า q ใด ๆ ให้ค่าความลึกมากกว่าความลึกวิกฤติเรียกการไหลในขณะนั้นว่า การไหลแบบช้ากว่าวิกฤติ (Subcritical Flow)

เมื่อใดก็ตามที่สภาพการไหลในทางน้ำเปิดที่ค่า q ใด ๆ ให้ค่าความลึกน้อยกว่าความลึกวิกฤติเรียกการไหลในขณะนั้นว่า การไหลแบบเหนือวิกฤติ (Supercritical Flow)

จากสมการ $E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$

ที่สภาวะวิกฤติค่า E จะมีค่าน้อยที่สุดหรือจะให้ค่า $\frac{dE}{dy} = 0$ และในขณะนั้น $y = y_c$ เมื่อ Differentiate สมการข้างบนแล้วให้เท่ากับ 0 แทนค่า $y = y_c$ จะได้

$$y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3} \qquad \text{----------(3.11)}$$

จาก $q_c = v_c . y_c$ แทนค่าในสมการ 3.11 ในที่สุดจะได้

จาก $\frac{q_c^2}{2gy_c^2} = \frac{y_c}{2}$ แทนค่าลงในสมการ 3.9 จะได้ $E_c = y_c + \frac{y_c}{2}$

$$E_c = (\frac{3}{2})y_c \qquad \text{----------(3.12)}$$

หรือ $$y_c = \left(\frac{2}{3}\right)E_c \qquad \text{----------(3.13)}$$

สมการที่ 3.13 บอกให้ทราบว่าในขณะที่การไหลมีสภาพเป็นแบบวิกฤตินั้ค่าความลึกของการไหลในขณะนั้นจะมีค่าเท่ากับ 2/3 ของพลังงานจำเพาะวิกฤติ

3. Froude Number, Fr

Froude Number (Fr) เป็นเทอมไร้มิติเทอมหนึ่ง มีสูตรที่ใช้คำนวณเป็น

$$Fr = \frac{v}{(gy)^{1/2}} \qquad \text{----------(3.14)}$$

ค่า Fr จะใช้เป็นตัวบอกว่าในขณะนั้นสภาพการไหลในทางน้ำเปิด จะเป็นแบบใดดังนี้

ถ้า Fr = 1 สภาพการไหลเป็นแบบวิกฤติ

ถ้า Fr < 1 สภาพการไหลเป็นแบบช้ากว่าวิกฤติ

ถ้า Fr > 1 สภาพการไหลเป็นแบบเหนือวิกฤติ

4. แรงจำเพาะ (Specific Force) หรือโมเมนตัมฟังชั่น (Momentum Function)

แรงจำเพาะหรือโมเมตัมฟังก์ชั่นที่หน้าตัดใด ๆ ของการไหล เขียนอยู่ในรูปทั่วไปของสมการทั่วไปดังนี้

$$M = \left(\frac{Q^2}{gA}\right) + A\bar{y} \qquad \text{----------(3.15)}$$

เมื่อ

E = ความลึกของน้ำวัดจากผิวอิสระไปยังจุดศูนย์ถ่วง (Centroid) ของพื้นที่หน้าตัดของการไหล

$\bar{y}$ = ในกรณีเป็นทางน้ำรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\bar{y} = \frac{y}{2}$$

และจาก $q = \frac{Q}{b}$ แทนค่าลงในสมการ 3.15 จะได้

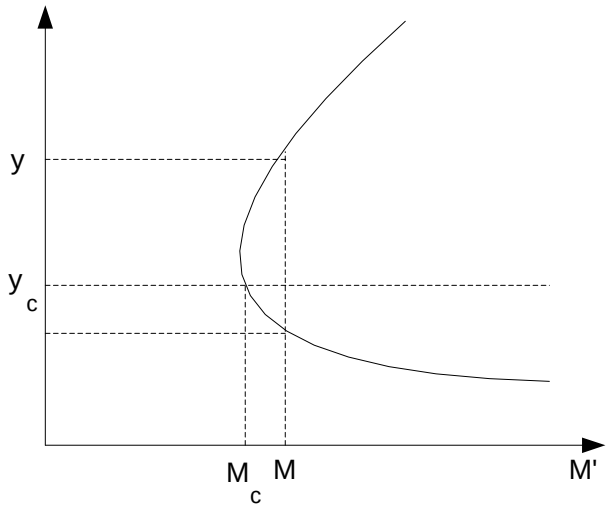
$$M = \left(\frac{q^2 b}{gy}\right) + \left(\frac{y^2 b}{2}\right) \qquad \text{----------(3.16)}$$

ถ้าให้ $M' = \frac{M}{b}$ หรือโมเมนตัมฟังก์ชั่นต่อหน่วยความกว้าง

จะได้

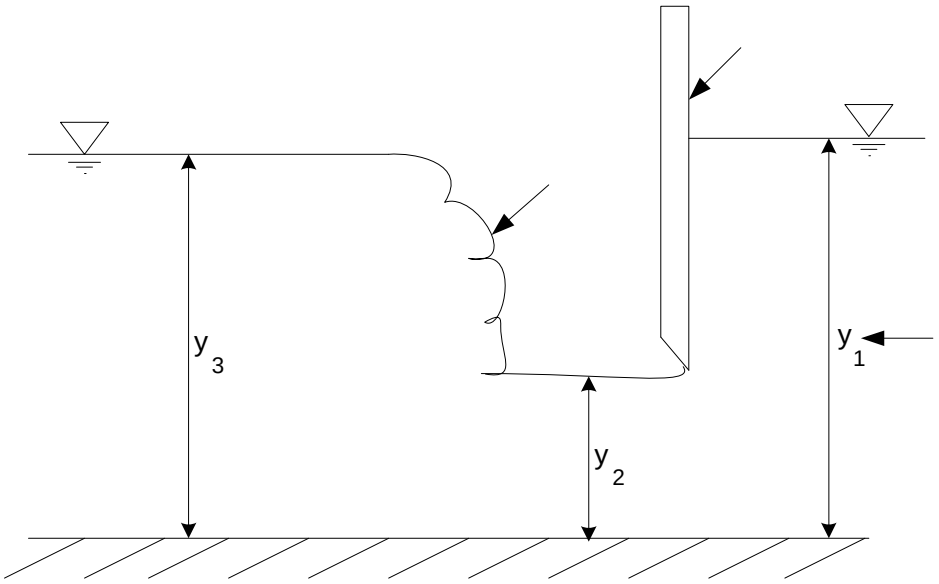
$$M' = \left(\frac{q^2}{gy}\right) + \left(\frac{y^2}{2}\right) \qquad \text{----------(3.17)}$$

เมื่อนำสมการ 3.17 มาเขียนเป็นกราฟได้เป็น



ภาพที่ 3.5 ลักษณะโมเมนตัมฟังก์ชัน

5. การไหลลอดบานระบายและไฮดรอลิกจั๊ม



ภาพที่ 3.6 ลักษณะการไหลลอดบานระบายและไฮดรอลิกจั๊ม

ตามภาพที่ 3.6 เมื่อมีการไหลลอดผ่านบานระบาย จะเห็นว่าน้ำจะพยายามปรับตัวขึ้นมา ทำให้เกิดลักษณะการไหลที่น้ำพยายามยกตัวขึ้น เรียกปรากฏการณ์ว่าการเกิดไฮดรอลิกจั๊ม เมื่อใช้หลักของแรงจำเพาะหรือโมเมนตัมฟังก์ชั่นมาพิจารณา จะทำให้ได้ว่า

$$y_3 = \frac{y_2}{2}\left(1 + 8Fr_2^2\right)^{1/2} - 1 \qquad \text{----------(3.18)}$$

วิธีการทดลอง

1) ปรับรางน้ำให้อยู่ในแนวราบและปรับบานระบายให้ขอบล่างสูงจากพื้นประมาณ 22 มิลลิเมตร วัดความกว้างของรางน้ำ บันทึกข้อมูล

2) เปิดเครื่องสูบน้ำปรับบานระบายจนเห็นว่าเกิดไฮดรอลิกจั๊ม ปรับฝายควบคุมน้ำด้านท้ายน้ำความลึกของการไหลจาก Jump มีค่าเท่ากันตลอด

3) วัดความลึก y_1, y_2 และ y_3 ด้วยเครื่องมือวัดความลึก บันทึกข้อมูลไว้

4) วัดปริมาตรของน้ำและจับเวลา บันทึกข้อมูลไว้

5) ปรับอัตราการไหลครั้งใหม่แล้วทำตามขั้นตอนตั้งแต่ข้อ 1) (ประมาณ 8 ครั้ง)

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ผลทดลองการไหลลอดประตูระบายน้ำและไฮดรอลิกจั๊ม
ความกว้างของรางน้ำ : _____

ผลการทดลอง	การทดลองครั้งที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1.ความลึก								
-y1								
-y2								
-y3								
2.ปริมาตร								
3.เวลา								

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณอัตราการไหล (Q) = ปริมาตร/เวลา และคำนวณอัตราการไหลต่อความกว้างของรางน้ำ (q)

2) คำนวณค่าพลังงานจำเพาะ (E) ของหน้าตัดที่วัดความลึก โดยใช้สมการที่ 3.9 และคำนวณค่าโมเมนตัมฟังก์ชั่น (M) ของหน้าตัดที่วัดความลึก

3) คำนวณค่าการสูญเสียพลังงานจำเพาะระหว่างจุด 1-2 และ 2-3

4) พล๊อตกราฟระหว่างค่าความลึก (y) กับค่า E และความลึกกับค่า M

เอกสารอ้างอิง

โครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2549. **คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ EGCE 322 Hydraulic Engineering Laboratory**.

ไตรรัตน์ ศรีวัฒนา, ชูเกียรติ ทรัพย์ไพศาล และพงษ์ศักดิ์ เสริมสาธนสวัสดิ์. 2524. **ปฏิบัติการทางชลศาสตร์**. เอกสารวิชาการ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิมิตร เฉิดฉันท์พิพัฒน์. **ปฏิบัติการกลศาสตร์ของของไหล**. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Bruce, R. M. 1990. **Fundamental of Fluid Mechanics**. John Wiley & Son pp. 655-668.

Essom Company Limited. 1999. **Technical Training Equipment.**

บทปฏิบัติการที่ 4

การวัดอัตราการไหลในท่อปิดและการศึกษาทฤษฎีของเบอร์นูลี่

(Flow Measurement and Bernoulli's Theorem)

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การวัดอัตราการไหลในท่อปิดและการศึกษาทฤษฎีของเบอร์นูลี่ โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

1. การวัดอัตราการไหลในท่อปิด (Flow Measurement)

วัตถุประสงค์

1) เพื่อทำความรู้จักเครื่องมือและวิธีใช้ในการวัดอัตราการไหลของของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ในท่อ

2) เพื่อหาค่าสัมประสิทธ์ของการไหลของเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบต่าง ๆ ได้แก่ มาตรวัดแบบโรตา (Rota Meter) มาตรวัดแบบท่อเวนจูรี (Venturi Meter) มาตรวัดชนิดแผ่นเจาะรู (Orifice Plate Meter) มาตรวัดแบบเทอร์ไบน์ (Turbine Meter) และมาตรวัดแบบท่อปิโตต-สเตติค (Pitot-Static Tube)

3) เพื่อปรับเทียบความถูกต้อง (Calibration) ของเครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดต่าง ๆ

ทฤษฎี

ในการวัดอัตราการไหลในท่อ ในบางครั้งไม่สามารถใช้มิเตอร์วัดอัตราการไหลแบบท่อน้ำประปาหรือไม่สามารถใช้ถังตวงได้ แต่สามารถนำเอาความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ความเร็ว และพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงสำหรับการไหลที่มีอัตราการไหลเท่ากัน มาคำนวณหาอัตราการไหลได้

เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบต่าง ๆ ได้แก่

1) มาตรวัดแบบโรตา (Rota Meter) ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ที่ของไหลผ่าน

2) มาตรวัดแบบท่อเวนจูรี (Venturi Meter) ใช้หลักความดันสูญเสีย

3) มาตรวัดชนิดแผ่นเจาะรู (Orifice Plate Meter) ใช้หลักความดันสูญเสีย

4) มาตรวัดแบบเทอร์ไบน์ (Turbine Meter) ใช้หลัก Impulse

5) มาตรวัดแบบท่อปิโตต-สเตติค (Pitot-Static Tube) ใช้หลักความเร็ว

ตอนที่ 1 มาตรวัดแบบโรตา (Rota Meter)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ชุดเครื่องมือทดสอบโต๊ะชลศาสตร์ (Hydraulics Bench)

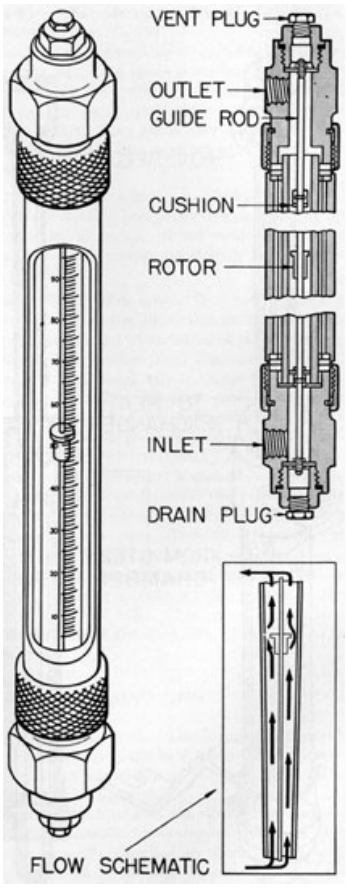
2) เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบโรตา ตามภาพที่ 4.1

3) นาฬิกาจับเวลา

4) น้ำสะอาดประมาณ 100 ลิตร

a) โต๊ะชลศาสตร์

b) มาตรวัดแบบโรตา



c) รายละเอียดของมาตรวัดแบบโรตา

ภาพที่ 4.1 ชุดเครื่องมือวัดอัตราการไหลด้วยมาตรวัดแบบโรตา

ทฤษฎี

มาตรวัดแบบโรตาประกอบด้วยท่อกลมเรียว (Tapered Tube) มีลูกลอยทรงกระบอกกลมปลายด้านล่างแหลมเป็นรูปกรวยอยู่ภายในท่อกลมเรียว ขณะใช้งานจะวางอยู่ในแนวดิ่ง ปลายด้านเล็กจะอยู่ด้านล่างเป็นทางเข้าของของไหล เมื่อของไหลไหลขึ้นในแนวดิ่งจะดันให้ลูกลอยถูกยกสูงขึ้นจนสมดุลย์ ของไหลจะไหลผ่านพื้นที่ว่างรูปวงแหวนระหว่างลูกลอยทับท่อเรียว ตำแหน่งความสูงของลูกลอยขึ้นอยู่กับอัตราการไหล เมื่อลูกลอยสมดุลย์น้ำหนักของลูกลอยจะเท่ากับแรงฉุด (Drag Force) ของของไหลกระทำต่อลูกลอย

สามารถใช้ค่าความสัมพันธ์ของแรงเหล่านี้มาใช้คำนวณหาอัตราการไหลในขณะนั้นได้ตามสมการ

$$Q = C_d A_a \left[\frac{2W_{Net}}{A_{Float}\rho_{Fluid}} \right]^{1/2} \qquad \text{----------(4.1)}$$

เมื่อ

W_{Net} = น้ำหนักสุทธิของลูกลอย

A_a = $A_{Tube} - A_{Float}$

A_{Tube} = พื้นที่หน้าตัดของท่อโรตา ณ ตำแหน่งที่ลูกลอยอยู่ในสถานะสมดุลย์

A_{Float} = พื้นที่หน้าตัดของลูกลอย

หรือ

A_a = พื้นที่วงแหวนของการไหลผ่านลูกลอย

ρ_{Fluid} = ความหนาแน่นของของไหลที่ต้องการวัด

C_d = สัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านมาตรวัดโรตา

มาตรวัดชนิดนี้ได้ทำการติดตั้งสเกลบอกขนาดอัตราการไหลไว้ที่บริเวณข้างหลอดของเครื่องมือวัด ทำให้สะดวกต่อการอ่านค่าอัตราการไหล อย่างไรก็ตามมาตรวัดแบบโรตาจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนมากในช่วงที่มีการไหลน้อย ๆ และไม่เหมาะกับของไหลที่มีค่าความหนาแน่นมากๆ

วิธีการทดลอง

1) ติดตั้งมาตรวัดโรตาเข้ากับชุดเครื่องมือทดสอบโต๊ะชลศาสตร์ ปลายเล็กด้านล่างต่อเข้ากับท่อส่งของปั๊มน้ำปลายใหญ่ด้านบนต่อกับวาล์วปรับอัตราการไหล และต่อท่อไปยังตวงวัด

อัตราการไหล เติมน้ำใส่ถังเก็บ (Reservoir Tank) ที่อยู่ด้านล่างของโต๊ะชลศาสตร์ ให้ระดับผิวน้ำอยู่ต่ำกว่าขอบบนของถังประมาณ 20 มิลลิเมตร ใช้น้ำประมาณ 100 ลิตร เปิดวาล์วท่อดูดน้ำของปั๊มให้อยู่ตำแหน่งเปิดสุด วาล์วปรับอัตราการไหลและวาล์วใช้ปั๊มร่วมทุกตัวปิดหมด

2) ติดตั้งเครื่องปรับความเร็วรอบของปั๊มและ Watt Meter พร้อมทั้งเสียบปลั๊กสายไฟ

3) เปิดสวิทซ์ให้ปั๊มน้ำทำงาน ปรับวาล์วปรับอัตราการไหล (Regulating Valve) ให้อ่านค่าอัตราการไหลที่โรตาได้ 10 ลิตร/นาที

4) วัดอัตราการไหลโดยใช้ถังตวง และนาฬิกาจับเวลา

5) วัดความสูงของลูกลอยในมาตรวัดโรตา

6) ปรับวาล์วปรับอัตราการไหลโดยทำซ้ำข้อ 3)-5) ด้วยการเพิ่มอัตราการไหลขึ้นครั้งละ 10 ลิตร/นาที จนถึงตำแหน่ง

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 Flow Measurement Using a Rota Meter

Results	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Quantity of Water Collected (litre)								
Time to Collect Water, T (sec)								
Volume Flow Rate, Q (litre/min)								
Rota Meter Reading Qr (litre/min)								
Height of Float (mm)								
Annulus Area (mm^2)								

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Results	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Error, E (%)								
Error of Full Scale, E_{FS} (%)								

Water Temperature : _____

Water Density : _____

Rota Meter Flow Rate VS Measured Flow Rate :

Slope = _____

Rota Meter Flow Rate VS Annulus Area :

Slope = _____

Meter Coefficient, C_r = _____

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณหาอัตราการไหลที่ได้จากการตวงและจับเวลา

2) พล๊อตกราฟอัตราการไหลที่ได้จากการวัดทั้ง 2 วิธี แล้วลากเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์จากจุดเริ่มต้น 0 พร้อมทั้งหาค่าความชันของเส้นตรง

3) หาค่าและเขียนกราฟเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของการวัดทั้ง 2 แบบ

4) หาค่าสัมประสิทธิ์ของการวัด (Meter Coefficient)

ตอนที่ 2 มาตรวัดแบบท่อเวนจูรี (Venturi Meter)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ชุดเครื่องมือทดสอบโต๊ะชลศาสตร์ (Hydraulic Bench)

2) ถังน้ำเข้าความสูงของน้ำคงที่ (Constant Head Inlet Tank)

3) ถังน้ำออกปรับความสูงได้ (Variable Head Outlet Tank)

4) มาตรวัดแบบท่อเวนจูรี (Venturi Meter)

5) มาโนมิเตอร์ (Manometer)

6) นาฬิกาจับเวลา

a) โต๊ะชลศาสตร์

b) มาตรวัดแบบท่อเวนจูรี

ภาพที่ 4.2 ชุดเครื่องมือวัดอัตราการไหลด้วยมาตรวัดแบบท่อเวนจูรี

ทฤษฎี

การไหลแบบต่อเนื่องผ่านจุด 1 และจุด 2 กำหนดให้

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลาง $B = \frac{D_2}{D_1}$

สมการ Bernoulli ระหว่างจุด (1) และ (2) โดยไม่คิดว่ามีการสูญเสียพลังงาน

$$\frac{p_1}{\gamma}+\frac{v_1^2}{2g}+z_1 = \frac{p_2}{\gamma}+\frac{v_2^2}{2g}+z_2 \qquad \text{----------(4.2)}$$

$$\left(\frac{p_1}{\gamma}+z_1\right)-\left(\frac{p_2}{\gamma}+z_2\right) = \frac{v_2^2}{2g}-\frac{v_1^2}{2g}$$

$$H_1-H_2=\Delta h = \frac{v_2^2}{2g}-\frac{v_1^2}{2g} \qquad \text{----------(4.3)}$$

จาก $A_1v_1 = A_2v_2$

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1}.v_2$$

แทนค่าใน (4.2) $$\Delta h = \frac{v_2^2}{2g}-\left(\frac{A_2}{A_1}.v_2\right)^2\times\frac{1}{2g}$$

$$= \frac{v_2^2}{2g}\left[1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]$$

หรือ $$v_2^2 = \frac{2g\Delta h}{\left[1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}$$

หรือ $$v_2 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\left[1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}} \qquad \text{----------(4.4)}$$

v_2 ตามสมการ 4.4 มีค่าไม่ตรงกับความเป็นจริง ต้องปรับแก้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์ความเร็วของการไหลผ่านมาตรวัดแบบท่อเวนจูรี (C_v) ดังนั้น

$$V_{2(Actual)} = \frac{C_v}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}}\sqrt{2g\Delta h} \quad \text{----------(4.5)}$$

เช่นเดียวกันเทอม $\frac{C_v}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right]}}$ สามารถเขียนใหม่ได้ในเทอมของสัมประสิทธิ์อีกค่าหนึ่ง ต่อไปนี้จะเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของมาตรวัดแบบท่อเวนจูรี (C_w)

ดังนั้น $V_{2\,(Actual)} = C_w\sqrt{2g\Delta h}$

และ $Q_{(Actual)} = C_w A_2\sqrt{2g\Delta h}$ ----------(4.6)

ในทางปฏิบัติสามารถหาค่า C_w ได้จาก

$$C_w = \frac{Q_{Measured}}{A_2\sqrt{2g\Delta h}} \quad \text{----------(4.7)}$$

วิธีการทดลอง

1) ต่อถังนำเข้า ถังน้ำออก มาตรวัดแบบท่อเวนจูรี และมาโนมิเตอร์เข้าด้วยกัน ต่อท่อนี้จาก Regulating Valve เข้าถังน้ำเข้า ปรับวาล์วให้น้ำล้นถังเข้าเล็กนอย ไล่ลมให้หมดจากมาโนมิเตอร์

2) ปรับอัตราการไหลโดยเริ่มที่ความสูงแตกต่างของมาโนมิเตอร์ 25 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นครั้งละ 25 มิลลิเมตร จนถึง 150 มิลลิเมตร หลังจากนั้นปรับอัตราการไหลใหม่เริ่มต้นท่ความสูงแตกต่าง 50 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 มิลลิเมตร จนถึง 500 มิลลิเมตร ที่ความสูงแตดต่างแต่ละค่าที่การวัดโดยวิธีตวงและจับเวลา

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 Flow Measurement Using Venturi Meter

Results	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Quantity of Water Collected (litre)								
Time to Collect Water, T (sec)								
Volume Flow Rate, Q (litre/min)								
Head at Venturi Mouth, H_1 (m)								
Head at Venturi Throat, H_2 (m)								
Head at Venturi Exit, H_3 (m)								
Venturi Diff. Head, $H_1 - H_2$ (m)								
Venturi Head Loss, $H_1 - H_3$ (m)								

Slope = _____

Coefficient of Discharge = $\frac{Q}{\sqrt{H}} \times \frac{1}{A_2} \times \sqrt{\frac{1-\beta'}{2g}}$ = Slope $\frac{1}{A_2} \times \sqrt{\frac{1-\beta'}{2g}}$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณอัตราการไหลในแต่ละขั้นตอนทั้ง 2 วิธี

2) พล๊อตกราฟของอัตราการไหลกับรากที่สองของ Head จาก มาโนมิเตอร์ แลลากเส้นตรงของกราฟจากจุดเริ่ม

3) วัดความชันของเส้นตรง และหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของมาตรวัดเวนจูรี

ตอนที่ 3 มาตรวัดชนิดแผ่นเจาะรู (Orifice Plate Meter)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ชุดเครื่องมือทดสอบโต๊ะชลศาสตร์ (Hydraulic Bench)

2) ถังน้ำเข้าความสูงของน้ำคงที่ (Constant Head Inlet Tank)

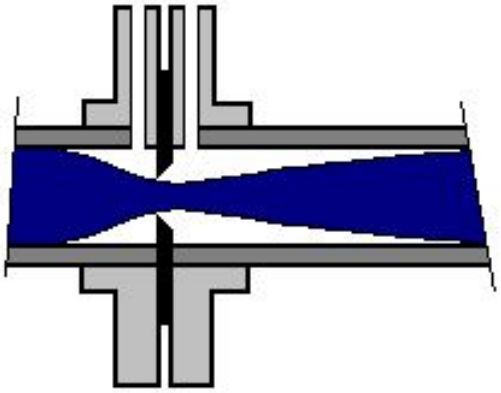
3) ถังน้ำออกความสูงปรับค่าได้ (Variable Head Outlet Tank)

4) มาตรวัดชนิดแผ่นเจาะรู (Orifice Plate) ขนาดรู Orifice 8 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร

5) มาโนมิเตอร์ (Manometer)

6) นาฬิกาจับเวลา

a) โต๊ะชลศาสตร์



b) มาตรวัดชนิดแผ่นเจาะรู

ภาพที่ 4.3 ชุดเครื่องมือวัดอัตราการไหลด้วยมาตรวัดชนิดแผ่นเจาะรู

ทฤษฎี

การไหลแบบต่อเนื่องผ่านจุด 1 และจุด 2 กำหนดให้

A_1 = พื้นที่หน้าตัดการไหลที่จุด (1) $= \frac{\pi d_1^2}{4}$

A_o = พื้นที่หน้าตัดของรูเจาะ (Orifice) $= \frac{\pi d_0^2}{4}$

A_2 = พื้นที่หน้าตดการไหลหลังการไหลจากผ่านรูเจาะมาแล้ว ซึ่งจะมีค่าน้อย

กว่า A_o เนื่องจากหน้าตัดการไหลจะมีสภาพกิ่วตัวลงเรียกว่า ปรากฏการณ์ลักษณะนี้ว่า Vena Contracta

พื้นที่ A_2 ไม่สะดวกในการหาค่า แต่อาศัยเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับ A_o ได้เป็น

$$A_2 = C_c A_o \qquad \text{----------(4.8)}$$

โดยที่

C_c = สัมประสิทธิ์การหดตัวของการไหล (Contraction Coefficient)ใช้สมการ Bernoulli ระหว่างจุด (1) กับ (2) โดยไม่คิดค่าการสูญเสียพลังงาน

จะได้

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \qquad \text{----------(4.9)}$$

จากสมการต่อเนื่อง

$$Q_2 = Q_0 \qquad \text{----------(4.10)}$$

หรือ $A_2 v_2 = A_0 v_0$

$$v_2 = \frac{A_0}{A_2}.v_0 = \frac{A_0}{C_c A_0}.v_0 = \frac{v_0}{C_c} \text{--(4.11)}$$

และจาก $Q_1 = Q_2$

หรือ $A_1 v_1 = A_2 v_2$

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1}.v_2 \quad ; \text{แทนค่า } v_2 = \frac{v_0}{C_c}$$

จะได้ $$v_1 = \frac{A_2}{A_1}.\frac{v_0}{C_c}$$

หรือ $$v_1 = \frac{C_c A_0}{A_1}.\frac{v_0}{C_c} = \frac{A_0}{A_1}.v_0 \quad \text{-----(4.12)}$$

นำสมการ 4.11 และ 4.12 ไปแทนค่าในสมการ 4.9 และจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\left(\frac{p_1}{\gamma}+z_1\right)-\left(\frac{p_2}{\gamma}+z_2\right) = \left(\frac{v_0}{C_c}\right)^2\frac{1}{2g}-\left(\frac{A_0}{A_1}.v_0\right)^2\frac{1}{2g}$$

เนื่องจากเทอม $\frac{p}{\gamma}+z =$ Static Head = ความสูงของน้ำในหลอดมาโนมิเตอร์ จะได้

$$H_1+H_1=\Delta h = \frac{v_0^2}{2g}\left[\frac{1}{C_c^2}-\left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2\right]$$

หรือ $$v_0^2 = \sqrt{\left[\frac{2g\Delta h}{\frac{1}{C_c^2}-\left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}\right]}$$

$$v_0 = \sqrt{\left[\frac{2g\Delta h}{\frac{1}{C_c^2}-\left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}\right]} \quad \text{----------(4.13)}$$

สมการ 4.13 เป็นความเร็วของการไหลผ่านรูระบาย (Orifice) ทางทฤษฎี ซึ่งจะยังไม่ตรงกับความเป็นจริง เนื่องจากไม่ได้นำค่าการสูญเสียพลังงานจากจุด (1) ไปจุด (2) มาคิด จึง

ต้องทำการปรับแก้ด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์มาคูณความเร็ว v_0 ในสมการ 4.13 สัมประสิทธิ์ตัวนั้นคือสัมประสิทธิ์ความเร็วการไหลผ่าน Orifice, C_v ดังนั้นความเร็ว v_0 ที่แท้จริงตามสมการ 4.13 จะเป็น

$$v_{0\,(Actual)} = \frac{C_v}{\sqrt{\left[\frac{1}{C_c^2} - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2\right]}}\sqrt{2g\Delta h} \quad \text{---------(4.14)}$$

หรือ

$$v_0 = \frac{\frac{C_v}{\sqrt{\frac{1}{C_c^2} - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}}}{}\sqrt{2g\Delta h}$$

ถ้ากำหนดให้ $\frac{C_v}{\sqrt{\frac{1}{C_c^2} - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์อีกค่าหนึ่งซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของรูระบาย ใช้สัญลักษณ์เป็น C_0

ดังนั้นจะได้

$$v_0 = C_0 x\sqrt{2g\Delta h}$$

จะได้

$$Q_0 = A_0 x C_0 x\sqrt{2g\Delta h} \quad \text{----------(4.15)}$$

เมื่อ

A_0 = พื้นที่หน้าตัดของรูระบาย
C_0 = สัมประสิทธิ์ของรูระบาย
Δh = ผลต่างของระดับน้ำในหลอดมาโนมิเตอร์

ในทางปฏิบัติจะหาค่าสัมประสิทธิ์ของรูระบายได้จาก

$$C_0 = \frac{Q_{Measured}}{Q_{Theory}}$$

หรือ

$$C_0 = \frac{Q_{Measured}}{A\sqrt{2g\Delta h}} \qquad \text{----------(4.16)}$$

วิธีการทดลอง

1) ต่อท่อ Orifice Plate เข้ากับถังน้ำเข้า ถังน้ำออก ต่อสายมาโนมิเตอร์เข้าด้วยกัน ไล่ลมออกจากมาโนมิเตอร์ให้หมด

2) ปรับอัตราการไหลให้ความสูงแตกต่างของมาโนมิเตอร์ 25 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นครั้งละ 25 มิลลิเมตร จนถึง 150 มิลลิเมตร และเริ่มที่ 50 มิลลิเมตร จนถึง 500 มิลลิเมตร ที่ความสูงแต่ละค่า วัดอัตราการไหลโดยใช้ถังตวงและจับเวลามาโนมิเตอร์ของ D กับ D/2 Tapping และ Corner Tapping

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 Flow Measurement Using a Orifice Plates (8 mm Orifice)

Results	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Quantity of Water Collected, Q (litre)								
Time to Collect Water, T (sec)								
Volume Flow Rate, Q (litre/min)								
D & D/2 Tapping Upstream, H_1 (m)								
D & D/2 Tapping Downstream, H_2 (m)								
D & D/2 Tapping Diff. Head, H (m)								

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

Results	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Corner Tapping Upstream, H_1 (m)								
Corner Tapping Downstream, H_2 (m)								
Corner Tapping Diff. Head, H (m)								

D & D/2 Tapping

Slope : _____

Coefficient of Discharge : _____

C_c by Stolz Equation : _____

Corner Tapping

Slope : _____

Coefficient of Discharge : _____

C_c by Stolz Equation : _____

ตารางที่ 4.4 Flow Measurement Using a Orifice Plates (12 mm Orifice)

Results	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Quantity of Water Collected, Q (litre)								
Time to Collect Water, T (sec)								
Volume Flow Rate, Q (litre/min)								
D & D/2 Tapping Upstream, H_1 (m)								
D & D/2 Tapping Downstream, H_2 (m)								
D & D/2 Tapping Diff. Head, H (m)								
Corner Tapping Upstream, H_1 (m)								

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

Results	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Corner Tapping Downstream, H_2 (m)								
Corner Tapping Diff. Head, H (m)								

D & D/2 Tapping

Slope : _____

Coefficient of Discharge : _____

C_d by Stolz Equation : _____

Corner Tapping

Slope : _____

Coefficient of Discharge : _____

C_d by Stolz Equation : _____

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณหาอัตราการไหล

2) พล๊อตกราฟอัตราการไหลกับรากที่สองของความสูงของมาโนมิเตอร์ของ Orifice แต่ละขนาดโดยแยกเป็นแบบ D และ D/2 Tapping และ Corner Tapping ลากเส้นตรงพร้อมทั้งหาค่าความชันของเส้นตรง

3) คำนวณหาค่า C_d และเปรียบเทียบกับผลของการทดลอง

ตอนที่ 4 มาตรวัดแบบเทอร์ไบน์ (Turbine Meter)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

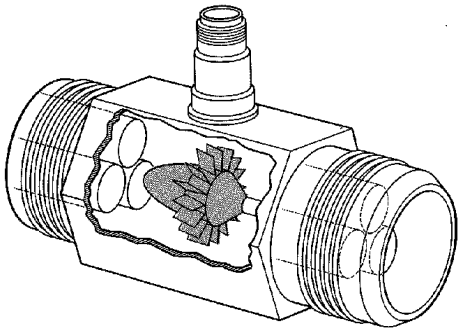
1) ชุดเครื่องมือทดสอบโต๊ะชลศาสตร์ (Hydraulic Bench)

2) มาตรวัดแบบเทอร์ไบน์ (Turbine Meter)

3) ถังน้ำเข้าความสูงคงที่ (Constant Head Inlet Tank)

4) นาฬิกาจับเวลา

a) โต๊ะชลศาสตร์



b) มาตรวัดแบบเทอร์ไบน์

ภาพที่ 4.4 ชุดเครื่องมือวัดอัตราการไหลด้วยมาตรวัดแบบเทอร์ไบน์

ทฤษฎี

$$Q^{\circ} = k_t . f \qquad \text{----------(4.17)}$$

เมื่อ

k_t = ปริมาตรของของไหลที่ทำให้ใบพัดหมุน 1 จังหวะ

f = ความถี่

วิธีการทดลอง

1) ติดตั้งมาตรวัดแบบเทอร์ไบน์ต่อเข้ากับถังน้ำเข้าความสูงคงที่ Transcucer จาก Turbine เข้าเครื่องวัดความถี่

2) เปิดสวิทซ์ปั๊มน้ำ ปรับ Regulating Valve ให้อ่านความถี่ได้ 10 เฮิร์ต วัดอัตราการไหลด้วยถังตวงและจับเวลา

3) เปิด Regulating Valve เพิ่มขึ้นให้ความถ่เพิ่มขึ้นครั้งละ 5 เฮิร์ต และทำการวัดด้วยถังตวงจับเวลาจนวาล์วเปิดสุด

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 4.5 Flow Measurement Using A Turbine Meter

Results	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Quantity of Water Collected (litre)								
Time to Collect Water, T (sec)								
Volume Flow Rate, Q (litre/min)								
Turbine Meter Frequency, f (Hz)								
Flow Rate Error, E (%)								
Flow Rate Error, E_{FS} (%)								

Slope = _____

Meter Constant = _____

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณหาอัตราการไหล

2) พล๊อตกราฟความถี่กับอัตราการไหล ลากเส้นตรงของกราฟจากจุดเริ่มต้นผ่านจุดผลลัพธ์ของกราฟ จัดความชันของเส้นตรงและหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของมิเตอร์ k_t

3) หาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการอ่านแต่ละครั้ง และพล๊อตกราฟของความคลาดเคลื่อนของการวัดกับอัตราการไหล

ตอนที่ 5 มาตรวัดแบบท่อปิโตด-สเตติค (Pitot-Static Tube)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ชุดเครื่องมือทดสอบโต๊ะชลศาสตร์ (Hydraulic Bench)

2) ถังน้ำเข้าความสูงของน้ำคงที่ (Constant Head Inlet Tank)

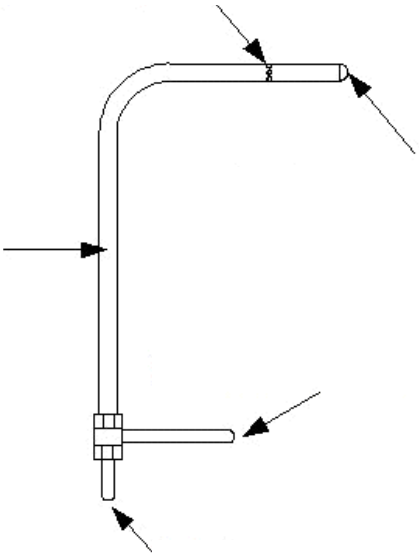
3) ถังน้ำออกความสูงคงที่ (Constant Head Outlet Tank)

4) มาตรวัดแบบท่อปิโตด-สเตติค (Pitot-Static Tube)

5) มาโนมิเตอร์ (Manometer)

6) นาฬิกาจับเวลา

a) โต๊ะชลศาสตร์



b) มาตรวัดแบบท่อปิโตด

ภาพที่ 4.5 ชุดเครื่องมือวัดอัตราการไหลด้วยมาตรวัดแบบท่อปิโตด

ทฤษฎี

มาตรวัดแบบท่อปิโตด-สเตติค (Pitot-Static Tube) ใช้วัดความเร็วที่จุดใดจุดหนึ่งในท่อ ประกอบด้วยท่อ 2 อันซ้อนกันโดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกันผิวด้านนอกท่อเจาะรูที่ปลายสำหรับวัดความดันสถิตย์ท่อรูในใช้วัดความดันรวม

$$\frac{p_1}{\gamma}+\frac{v_1^2}{2g}+z_1 = \frac{p_2}{\gamma}+\frac{v_2^2}{2g}+z_2 \;;z_1=z_2 \text{ --------(4.18)}$$

จะได้ $$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma}-\frac{p_1}{\gamma}+\frac{v_2^2}{2g} \text{ ----------(4.19)}$$

จาก $$H_1 = \frac{p_1}{\gamma}+z_1 \text{ (Static Head)}$$

$$H_2 = \frac{p_2}{\gamma}+\frac{v_2^2}{2g}+z_2 \text{ (Total Head)}$$

$$\therefore H_1-H_2 = \frac{p_2}{\gamma}-\frac{p_1}{\gamma}+\frac{v_2^2}{2g} = \Delta h$$

แทนค่าลงในสมการ 4.19

จะได้ $$\frac{v_1^2}{2g} = \Delta h$$

หรือ $$v_1 = \sqrt{2g\Delta h} \text{ ----------(4.20)}$$

แต่ v_1 ที่ได้ยังไม่ถูก ต้องปรับแก้ด้วยสัมประสิทธิ์ความเร็ว, C_v

$$v_{1\,(\text{Actual})} = C_v\sqrt{2g\Delta h}$$

ดังนั้น $$Q_{1\,(\text{Actual})} = C_v Q_1\sqrt{2g\Delta h} \text{ ----------(4.21)}$$

หรือกล่าวได้ว่าในกรณีมาตรวัดแบบปิโตดนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ของปิโตด (C_p) มีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์ของความเร็ว (C_v) เช่นเดียวกันในทางปฏิบัติจะหาค่าสัมประสิทธิ์ของท่อปิโตดและค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วได้จาก

$$C_p \text{ หรือ } C_v = \frac{Q_{Measured}}{A_1\sqrt{2g\Delta h}} \qquad \text{----------(4.22)}$$

วิธีการทดลอง

1) ประกอบมาตรวัดแบบท่อปิโตด-สเตติคเข้ากับถังน้ำเข้าและถังน้ำออกเริ่มเดินปั๊มไล่ลมออกจากมาโนมิเตอร์

2) ปรับอัตรากรไหลให้ความดันบนมาโนมิเตอร์แตกต่างกัน 50 มิลลิเมตร วัดอัตราการไหลโดยใช้ถังตวง และวัดความดัน ความเร็วที่จุดต่าง ๆ ในท่อ และ Therr Diameter และ Two Diameter

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 4.6 Flow Measurement Using A Pitot-Static Meter

Results	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Low Flow Rate								
Quantity of Water Collected, Q (litre)								
Time to Collect Water, T (sec)								
Volume Flow Rate, Q (litre/min)								
Traverse Radius (mm)								
Total Head, H_t (m)								
Static Head, H (m)								
Dynamic Head, H_t-H (m)								
Velocity, v (m/s)								
Mean Velocity (m/s)								
Calculated Volume Flow Rate (litre/min)								

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

Results	Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Low Flow Rate								
Quantity of Water Collected, Q (litre)								
Time to Collect Water, T (sec)								
Volume Flow Rate, Q (litre/min)								
Traverse Radius (mm)								
Total Head, H_t (m)								
Static Head, H (m)								
Dynamic Head, H_t-H (m)								
Velocity, v (m/s)								
Mean Velocity (m/s)								
Calculated Volume Flow Rate (litre/min)								

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณหาอัตราการไหล ความดันสถิตย์ (Static Head) ความดันพลวัติ (Dynamic Head) เฮดรวม (Total Head) พร้อมทั้งคำนวณหาความเร็วของการไหล

2) พล๊อตกราฟ Ps, Pd, Pt และความเร็วกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

3) คำนวณหาความเร็วเฉลี่ยและหาอัตราการไหล เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการตวง

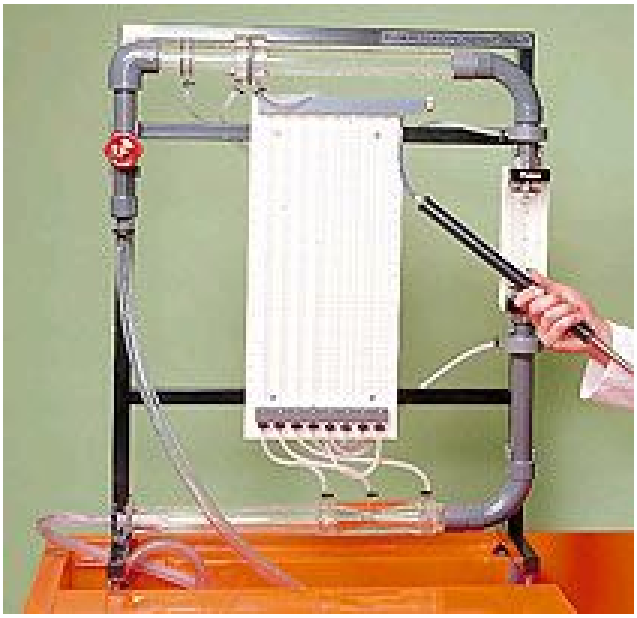
2. การศึกษาทฤษฎีของเบอร์นูลี่ (Bernoulli's Theorem)

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างเฮดความดัน (Pressure Head) และเฮดความเร็ว (Velocity Head) และเฮดระดับ (Elevation Head) ที่ได้จากชุดทดลอง และนำไปเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของเฮดดังกล่าวตามทฤษฎีของเบอร์นูลี

อุปกรณ์และเครื่องมือ

บนแผงชุดทดลองทฤษฎีของเบอร์นูลีตามภาพที่ 4.7 ประกอบด้วย



ภาพที่ 4.7 ท่อเวนจูรีบนแผงชุดทดลอง

1) ท่อเวนจูรี (Venturi Meter) ติดตั้งหลอดมาโนมิเตอร์เพื่อใช้วัดเฮดตามแนวท่อเวนจูรี จำนวน 7 จุด (ยกเว้นจุดที่ 7 เป็น Pitot Tube) ท่อมาโนมิเตอร์ทั้ง 7 นี้มีมาตรวัดเฮดได้ในช่วงสูงสุด 60 เซนติเมตร ด้านบนของมาโนมิเตอร์มีกระเปาะต่อกับสูบลมเพื่ออัดลมเข้าหรือระบายลมออก กรณีต้องการให้สามารถอ่านค่าเฮดได้ในช่วง 60 เซนติเมตร ดังกล่าว นอกจากนี้บริเวณปลายท่อด้านน้ำออกจะมีวาล์วควบคุมความดัน เพื่อใช้ควบคุมระดับน้ำในหลอดสายยางให้สามารถอ่านค่าได้นอกเหนือจากการควบคุมด้วยการสูบลมเข้าหรือระบายออก

2) อุปกรณ์วัดเฮดรวม (Total Head) ลักษณะเป็นท่อกลมเหล็กเล็ก ๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 3 มิลลิเมตร เรียกว่า Pitot Tube ท่อนี้สามารถเลื่อนไปมาในแนวท่อ

เวนจูรี เพื่อใช้วัดเฮดรวม ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามที่ต้องการ โดยอ่านค่าเฮดจากระดับน้ำในหลอดสายยางที่ 7 นับจากซ้ายไปขวา

3) ชุดทดลองนี้จะต้องใช้ร่วมกับโต๊ะชลศาสตร์ ซึ่งจะมีอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดมาตรวัดโรตา ใช้สำหรับดูขนาดอัตราการไหลที่ผู้ทดลองเปลี่ยนไปในแต่ละครั้ง

4) นาฬิกาจับเวลา

ทฤษฎี

ทฤษฎีของเบอร์นูลีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฮดความดัน เฮดความเร็ว และเฮดเนื่องจากระดับของของไหลประเภทไม่มีความหนืด (Inviscid Fluid) ของไหลประเภทยุบตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) และสถานะการไหลเป็นแบบคงที่ (Steady Flow)

- <u>เฮดความดัน (Pressure Head, H_p)</u>

ค่าความดันนอกจากจะบอกเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เช่น นิวตัน/ตารางเมตร (N/m) หรือปอนด์/ตารางนิ้ว (psi) หรือกิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (ksc) แล้ว ถ้าเป็นความดันของของเหลวก็มักนิยมบอกเป็นแท่งความสูงของของไหลที่จะก่อให้เกิดความดันที่กำหนดบนผิวหน้าซึ่งรองรับแท่งของไหลนั้น ความดันซึ่งบอกเป็นแท่งความสูงของของไหลนี้เรียกว่า เฮดความดัน (Pressure Head)

ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (p) และเฮดความดัน (H_p) คือ

$$H_p = \frac{p}{\gamma} = \frac{p}{\rho g} \qquad \text{----------(4.23)}$$

เมื่อ

γ = น้ำหนักจำเพาะของของไหล
ρ = ความหนาแน่นของของไหล
g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

- <u>เฮดความเร็ว (Velocity Head, H_v)</u>

ของไหลที่ไหลในท่อหรือทางน้ำเปิดด้วยความเร็วใด ๆ นั้นมีพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) อยู่ พลังงานส่วนนี้เมื่ออธิบายในรูปของเฮดคือ

$$H_v = \frac{v^2}{2g} \qquad \text{----------(4.24)}$$

เมื่อ

v = ความเร็วเฉลี่ยของการไหล

เฮดความเร็วอาจให้คำจำกัดความได้อีกอย่างหนึ่งว่า เป็นความสูงที่ของเหลวตกลงมาด้วยแรงดึงดูดของโลกจนได้ความเร็วเท่ากับความเร็วในการไหลของของเหลวนั้น

❑ <u>เฮดระดับ (Elevation Head, H_e)</u>

ของไหล ณ จุดใด ๆ เมื่ออยู่ในระดับที่สูงกว่า มีแนวโน้มที่จะไหลลงสู่ระดับที่ต่ำกว่าด้วยพลังงานชนิดหนึ่งที่เรียกว่า พลังงานศักย์ (Potential Energy) พลังงานนี้เมื่อวัดในรูปของเฮดเรียกว่า เฮดระดับ

$$H_e = z \qquad \text{----------(4.25)}$$

เมื่อ

z = ระดับหรือความสูง ณ จุดใด ๆ ที่พิจารณาของของไหล

ตามทฤษฎีของเบอร์นูลี่แสดงให้เห็นว่า ที่ตำแหน่งใด ๆ ตลอด Stream Line ผลรวมของเฮดความดัน เฮดความเร็ว และเฮดเนื่องจากระดับจะมีค่าคงที่ตลอด Stream Line หรือเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{ค่าคงที่} \qquad \text{----------(4.26)}$$

หรือ

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} + z_3 \qquad \text{----(4.27)}$$

เมื่อ

$\frac{p}{\gamma}$ = เฮดความดัน

$\frac{v^2}{2g}$ = เฮดความเร็ว

z = เฮดระดับ

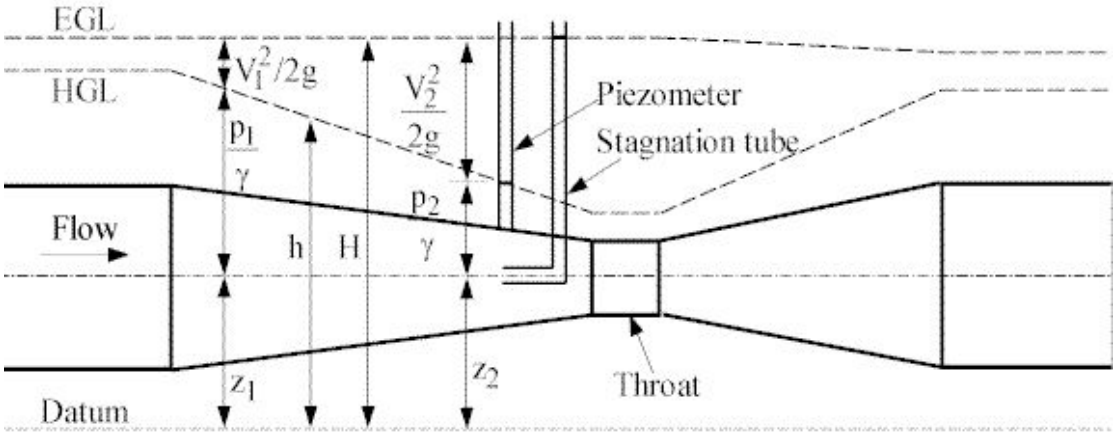
ผลรวมของเฮดทั้งสามเรียกว่า เฮดรวม (Total Head, H_T)

ผลรวมระหว่างเฮดความดันกับเฮดระดับจะเรียกว่า เฮดสถิตย์ (Static Head /Piezometric Head)

เส้นที่ลากต่อเชื่อมแต่ละจุดของค่าเฮดสถิตย์ (Static Head) ไปตามระยะทางของการไหลเรียกว่า เส้นระดับชลศาสตร์ (Hydraulic Grade Line, HGL หรือ Piezometric Head)

เส้นที่ลากต่อเชื่อมแต่ละจุดของค่าเฮดรวม (Total Head) ไปตามระยะทางของการไหลเรียกว่า เส้นระดับพลังงาน (Energy Grade Line, HGL)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า เส้นระดับชลศาสตร์กับเส้นระดับพลังงานจะต่างกันเท่ากับเฮดความเร็ว ($\frac{v^2}{2g}$) ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 เส้นระดับชลศาสตร์และเส้นระดับพลังงาน

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงของไหลทุกชนิดจะเป็นของไหลประเภทที่มีความหนืดแทบทั้งสิ้น (มากหรือน้อยแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของของไหล) ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นในขณะเกิดการไหล ดังนั้นสมการของเบอร์นูลี เมื่อจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์การ

ไหลของของไหล จะต้องรวมค่าการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างจุด 2 จุดในการไหลเข้าไปด้วย กล่าวคือหากการไหลจากจุดที่ (1) ไหลไปยังจุดที่ (2) สมการเบอร์นูลีที่ถูกต้องจะต้องเป็น

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{L1-2} \quad \text{----------(4.28)}$$

เมื่อ

h_{L1-2} = ค่าการสูญเสียพลังงานระหว่างจุด (1) และ (2)

ในทางปฏิบัตินั้น ค่าผลรวมระหว่างเฮดความดัน ($\frac{p}{\gamma}$) และค่าเฮดระดับ (z) สามารถวัดได้โดยใช้พีซโซมิเตอร์ (Piezometer) และมาโนมิเตอร์ (Manometer) ส่วนค่าเฮดรวม ($\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z$) สามารถวัดค่าได้โดยใช้อุปกรณ์ชนิด Pitot Tube

วิธีการทดลอง

1) ต่อท่อน้ำจากเครื่องสูบน้ำของโต๊ะชลศาสตร์เข้าไปยังชุดทดลอง เปิดวาล์วทางออกของชุดทดลองไว้ เพื่อให้น้ำไหลเข้าสู่ถังวัดปริมาตรของโต๊ะชลศาสตร์

2) เปิดวาล์วให้น้ำเข้าสู่ชุดทดลอง โดยเริ่มต้นที่อัตราการไหลต่ำสุดประมาณ 5 ลิตร/นาที (ดูจากมาตรวัดโรตา) ปรับระดับน้ำในหลอดมาโนมิเตอร์ทุกหลอดโดยใช้การสูบลมเข้าหรือระบายลมออก จนสามารถอ่านค่าระดับน้ำในหลอดได้

3) บันทึกระดับน้ำในหลอดมาโนมิเตอร์จากหลอดสายยางที่ 1-8 ยกเว้นหลอดที่ 7 ลงในตารางที่ 4.7 เป็นค่า H_m วัดปริมาตรน้ำ พร้อมกับจับเวลา บันทึกข้อมูลลงในตาราง จากนั้นเลื่อนหลอดวัดเฮดรวม (ท่อปิโตต) โดยให้ปลายท่อวัดอยู่ ณ จุดที่ต้องการวัดเริ่มตั้งแต่จุดที่ 1-8 แต่ละจุดที่วัดโดยท่อปิโตต ให้อ่านค่าระดับน้ำจากสายยางหลอดที่ 7 บันทึกค่าที่ได้ลงในตารางที่ 4.7 เป็นค่า H_T

4) เปิดวาล์วเพิ่มอัตราการไหลเป็นประมาณ 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ลิตร/นาที (อย่างน้อยควรทำการทดลองให้ได้ 7 ครั้งขึ้นไป) จากนั้นทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3) จนครบ

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองชุดทดลองทฤษฎีของเบอร์นูลี

พื้นที่หน้าตัดการไหล ; A_1 : _____ mm^2 A_2 : _____ mm^2 A_3 : _____ mm^2

A_4 : _____ mm^2 A_5 : _____ mm^2 A_6 : _____ mm^2

A_8 : _____ mm^2

ครั้งที่	จุดที่ 1		จุดที่ 2		จุดที่ 3		จุดที่ 4		จุดที่ 5		จุดที่ 6		จุดที่ 8		ปริมาตรน้ำ	เวลาที่จับ	อัตราการไหล		หมาย
	H_m	H_T	H_m	H_T	H_m	H_T	H_m	H_T	H_m	H_T	H_m	H_T	H_m	H_T	(litre)	(sec)	l/sec	cms	เหตุ
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			

หมายเหตุ : H_m = ระดับน้ำในหลอดมาโนมิเตอร์ (mm), H_T = ระดับน้ำในหลอดที่ 7 (mm)

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองชุดทดลองทฤษฎีของเบอร์นูลี

ครั้งที่	จุดที่ 1			จุดที่ 2			จุดที่ 3			จุดที่ 4			จุดที่ 5			จุดที่ 6			จุดที่ 8			หมายเหตุ
	$v=\frac{Q}{A}$	$\frac{v^2}{2g}$	$H_m+\frac{v^2}{2g}$	$v=\frac{Q}{A}$	$\frac{v^2}{2g}$	$H_m+\frac{v^2}{2g}$	$v=\frac{Q}{A}$	$\frac{v^2}{2g}$	$H_m+\frac{v^2}{2g}$	$v=\frac{Q}{A}$	$\frac{v^2}{2g}$	$H_m+\frac{v^2}{2g}$	$v=\frac{Q}{A}$	$\frac{v^2}{2g}$	$H_m+\frac{v^2}{2g}$	$v=\frac{Q}{A}$	$\frac{v^2}{2g}$	$H_m+\frac{v^2}{2g}$	$v=\frac{Q}{A}$	$\frac{v^2}{2g}$	$H_m+\frac{v^2}{2g}$	
1																						
2																						
3																						
4																						
5																						
6																						
7																						
8																						

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) ในแต่ละจุดของท่อเวนจูรี ให้คำนวณค่าความเร็วของการไหล (v) จากสูตร $v = Q/A$ เมื่อ Q = อัตราการไหล, A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ จากนั้นคำนวณค่าเฮดความเร็ว ($\frac{v^2}{2g}$) ใส่ค่าลงในตารางที่ 4.8

2) รวมค่าเฮดความเร็ว ($\frac{v^2}{2g}$) กับค่าเฮดสถิตย์ (H_m) ของแต่ละจุดวัด

3) พล๊อตกราฟระหว่างตำแหน่งที่วัดกับเฮดรวม (H_T) ของแต่ละอัตราการไหล (Q)

4) พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างค่า $H_m + \frac{v^2}{2g}$ กับค่า H_T ในแต่ละจุดวัดของแต่ละ Q

5) พิจารณาเปรียบเทียบค่า H_T ของแต่ละจุดในแต่ละ Q จากกราฟที่ได้

6) พิจารณาลักษณะของเส้นกราฟแต่ละเส้นที่ได้

เอกสารอ้างอิง

โครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2549. **คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ EGCE 322 Hydraulic Engineering Laboratory**.

นิมิตร เฉิดฉันท์พิพัฒน์. **ปฏิบัติการกลศาสตร์ของของไหล**. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Essom Company Limited. 1999. **Technical Training Equipment.**

บทปฏิบัติการที่ 5

การศึกษาเสถียรภาพของเรือ

(Stability and Bouyancy)

วัตถุประสงค์

การทดลองเรื่องเสถียรภาพของเรือมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงวิธีการหาเสถียรภาพของเรือที่ลอยอยู่ในน้ำ เพื่อที่จะได้นำมาเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้ทางทฤษฎี

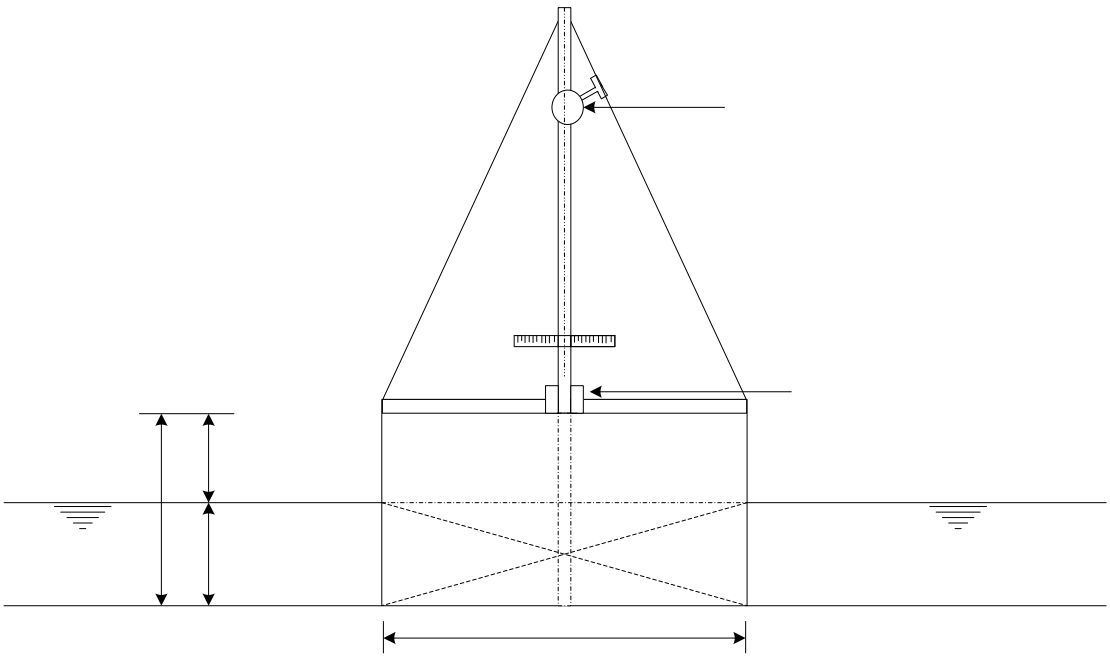
อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) เรือ (Vessel/Pontoon) ซึ่งมีน้ำหนักเลื่อนได้ (Jokey Weight) พร้อมเสา ซึ่งมีน้ำหนักเลื่อนได้บนเสานี้ เพื่อทำให้ศูนย์ถ่วงของเรือ G เลื่อนขึ้นลงได้ ตามภาพที่ 5.1

2) ถังน้ำสำหรับให้เรือลอยได้

3) สันบาง (Knife Edge) สำหรับหาตำแหน่งศูนย์ถ่วงของเรือ

4) ไม้บรรทัดวัดระยะ



a) เรือ (Vessel/Pontoon)

b) การวัดระยะจุดศูนย์ถ่วงของเรือ

c) Metacentric Height Apparatus

ภาพที่ 5.1 ชุดทดสอบเสถียรภาพของเรือ

ทฤษฎี

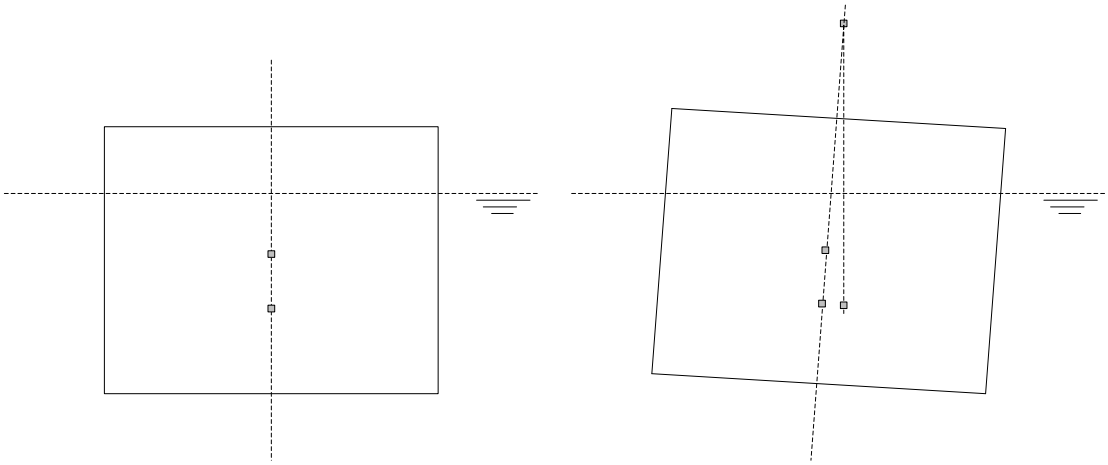
ในการทดลองเพื่อหาเสถียรภาพของเรือนั้น จะใช้ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการลอยตัวของวัตถุในของไหลของอาคีมีดีสเป็นหลักในการนำมาพิจารณาเพื่อที่จะหาแรงลอยตัว ลักษณะของความสมดุลย์ของการลอยตัว การหาความสูงของเมตาเซนตริค (Metacentric Height) และการหารัศมีเมตาเซนตริค (Metacentric Radius) เป็นต้น

1. แรงพยุงและการลอยตัว (Buoyancy Force and Floatation)

ตามหลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการลอยตัวของวัตถุในของไหล ของอาคีมีดีส กล่าวไว้ว่า เมื่อวัตถุจุ่มหรือจมอยู่ในของเหลว จะมีแรงซึ่งเกิดจากสถิตศาสตร์ของของไหลมากระทำกับวัตถุนั้น ซึ่งเรียกแรงนั้นว่า แรงพยุง และแรงพยุงจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของไหลซึ่งมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของวัตถุที่แทนที่ในของไหลนั้น

จากภาพที่ 5.2 จะเห็นว่าเมื่ออยู่ในภาวะสมดุลย์

แรงพยุง = น้ำหนักของของไหล ปริมาตรเท่ากับปริมาตรของวัตถุที่แทนที่ในของไหล



ภาพที่ 5.2 การลอยตัวของวัตถุในของไหล

เมื่อ

F_b = แรงพยุงมีหน่วยเป็นนิวตัน

ρ = ความหนาแน่นมวลของของไหล มีหน่วยงานเป็น กก./ม.^{2}

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีหน่วยเป็น ม./วินาที^{2}

V = ปริมาตรของวัตถุส่วนที่จมน้ำมีหน่วยเป็น ม.^{3}

โดยที่แรงพยุงนี้กระทำในแนวดิ่ง ผ่านจุด Centroid ของของไหลที่ถูกวัดแทนที่ และเรียกจุดนั้นว่าจุดศูนย์กลางของการลอยตัว (จุด B)

พิจารณาจากภาพที่ 5.2 จะเห็นว่าน้ำหนักของเรือจะทำให้เกิดแรง F_G มีทิศทางลงและกระทบในแนวดิ่ง ผ่านจุด G (จุดศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วงของวัตถุ) ซึ่งแรงนี้มีค่าเท่ากับแรงพยุงซึ่งกระทำผ่านจุด B ฉะนั้นจึงไดข้อสรุปว่า เมื่อเกิดความสมดุลย์ในทางสถิตศาสตร์ และเรือไม่มีการโคลงตำแหน่งของจุด B และจุด G จะต้องอยู่ในแนวดิ่งเดียวกัน

ถ้าทำให้เรือโคลง นั่นก็คือทำให้เสียความสมดุลย์ทางสถิตศาสตร์ ตำแหน่งของจุด B ก็จะเลื่อนไปอยู่ที่จุด B′ แนวแรงการพยุงซึ่งกระทำในแนวดิ่งผ่านจุด B′ จะไปตัดกับแนวที่ผ่านจุด B และจุด G เดิมจุด M ซึ่งเรียกจุด M นี้ว่า จุดศูนย์กลางเมตา (Metacenter)

ระยะทางระหว่างจุด M และจุด G (MG) นั้นเรียกว่าความสูงเมตาเซ็นตริค ซึ่งค่าความสูงเมตาเซ็นตริคนี้จะนำไปใช้อธิบายเรื่องการทรงตัวของวัตถุต่อไป

2. การทรงตัวของวัตถุในของไหล (Conditions of Stability)

การทรงตัวของวัตถุในของไหลนั้น แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะโดยถือเอาระยะ MG (ความสูงของเมตาเซ็นตริค) เป็นตัวกำหนดดังนี้

- การทรงตัวที่เสถียรมีความสมดุลย์มั่นคง (Stable Equilibrium)

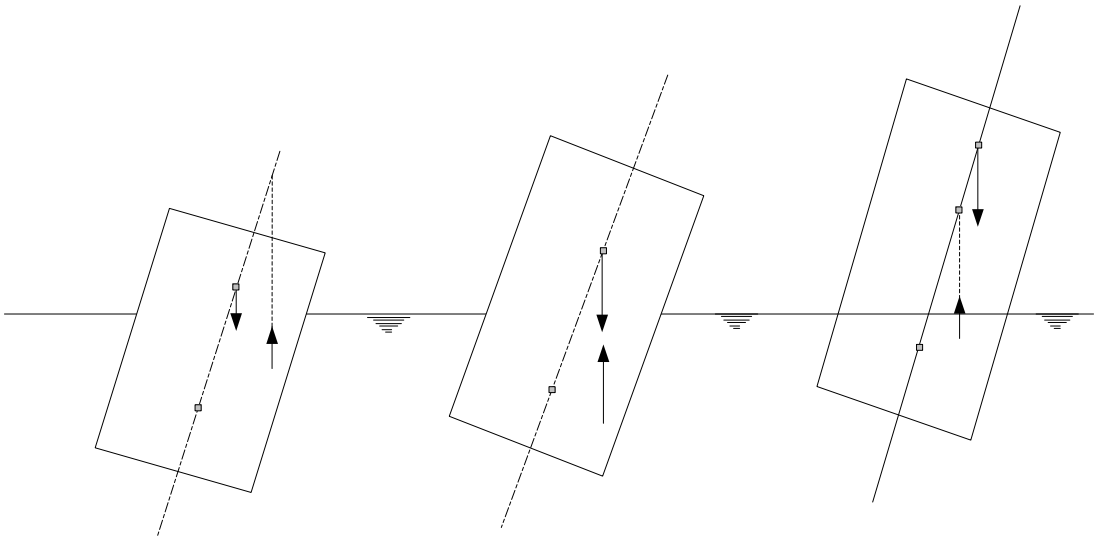
การทรงตัวแบบนี้ จุด M จะอยู่สูงกว่าจุด G นั้นคือระยะ MG เป็นบวก ฉะนั้นเกิดโมเมนต์ของแรง F_B กับ F_G เพื่อจุดให้วัตถุกลับตำแหน่งเดิม ดูภาพที่ 5.3a

- การทรงตัวที่สะเทินมีความสมดุลย์เป็นกลาง (Neutral Equilibrium)

การทรงตัวแบบนี้ จุด M กับจุด G จะอยู่ในจุดเดียวกัน นั่นคือระยะ MG เท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นจะไม่เพิ่มโมเมนต์ในการฉุดวัตถุกลับตำแหน่งเดิม นั่นคือ วัตถุจะคงอยู่ในตำแหน่งเอียงและไม่กลับตำแหน่งเดิม ดูภาพ 5.3b

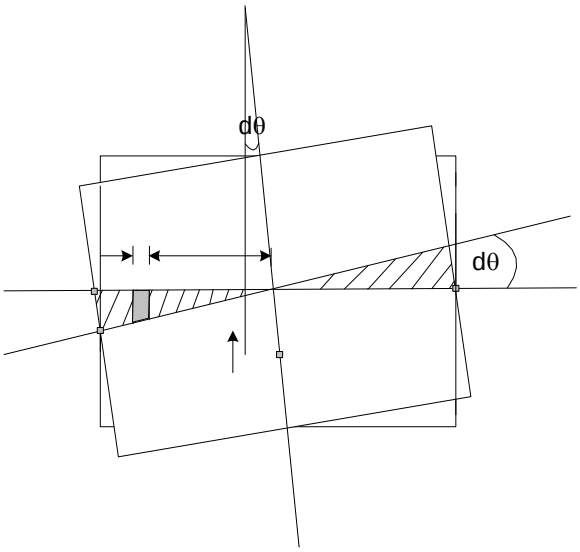
- การทรงตัวที่ไม่เสถียรมีความสมดุลไม่มั่นคง (Unstable Equilibrium)

การทรงตัวแบบนี้ จุด M จะอยู่ต่ำกว่าจุด G นั่นคือระยะ MG เป็นลบ ฉะนั้นเกิดโมเมนต์ของแรง F_B กับ F_G ดึงให้วัตถุพลิกคำ่ ดูภาพ 5.3c



ภาพที่ 5.3 การทรงตัวของวัตถุในของไหล

3. การหารัศมีเมตาเซ็นตริค และความสูงเมตาเซ็นตริคในทางทฤษฎี



ภาพที่ 5.4 การโคลงของวัตถุที่ลอยอยู่ในของไหล

เมื่อวัตถุตามภาพที่ 5.4 มีการเอียงตัวไปเป็นมุม θ จะเห็นว่าส่วนของลูกบาศก์ OEF จะจมลงไปในของไหล ขณะเดียวกันส่วนของลูกบาศก์ OAC จะลอยขึ้น แรงพยุงที่เกิดจากปริมาตรของของไหลของลูกบาศก์ทั้งสองนี้ จะทำให้เกิดโมเมนต์ซึ่งทำให้วัตถุโคลงไปมารอบจุด O

จะเห็นได้ว่าวัตถุลอยโคลงอยู่ในตำแหน่งดังที่แสดงในภาพที่ 5.3 แรงพยุงจะเลื่อนไปกระทำที่จุด B' เพราะฉะนั้นถ้าถือว่าวัตถุลอยอยู่ในสมดุลย์ในลักษณะนี้จะได้

โมเมนต์ของแรงที่เกิดขึ้นจากลูกบาศก์ OEF = โมเมนต์ของแรงที่เกิดขึ้นจากแรงพยุงซึ่งย้ายจากจุด B ไปยังจุด B'

พิจารณาส่วนของ dy ตามภาพที่มีความยาว 1 หน่วย ลึกเข้าไปในกระดาษจะได้

มวลของน้ำในส่วน $dy = \rho x$ ปริมาตรของส่วนของ dy

$$= \rho y . \tan d\theta \, dy$$

$\therefore$ น้ำหนักของน้ำในส่วนของ $dy = \rho g y . \tan d\theta \, dy$

$\therefore$ โมเมนต์ของน้ำในส่วน dy รอบจุด $\quad O = \rho g.\tan d\theta.y^2\,dy$

$\therefore$ โมเมนต์ของน้ำทั้งหมดในลูกบาศก์ $\quad OEF = \rho g.\tan d\theta \int_0^A y^2 dy$

$$= \rho g.\tan d\theta.I$$

กรณีที่ θ เป็นมุมเล็กๆ

$$\tan d\theta = dO$$

$\therefore$ โมเมนต์ทั้งหมด $= \rho g.dO.I$ ----------(5.1)

เมื่อ I = โมเมนต์ที่สองของพื้นที่ (2^{nd} Moment of Area) ของหน้าตัดเส้นขอบน้ำหนักวัตถุทางยาว

ในทำนองเดียวกัน

โมเมนต์ทั้งหมดเนื่องจากแรงพยุงที่เลื่อนจากจุด B ไปยัง $B' = F_B \times BB'$

$$= \rho gV \times BB'$$

$$= \rho gV \times MB.\tan d\theta$$

สำหรับเอียงมุมเล็ก $= \rho gV \times MB.d\theta$ ----------(5.2)

เมื่อ V = ปริมาตรของของไหลที่ถูกแทนที่โดยวัตถุ 5.1 = 5.2 จะได้

$$\rho.g.d\theta.I = \rho.gV \times MB.d\theta$$

จะได้ $\quad MB = \frac{I}{V}$ ----------(5.3)

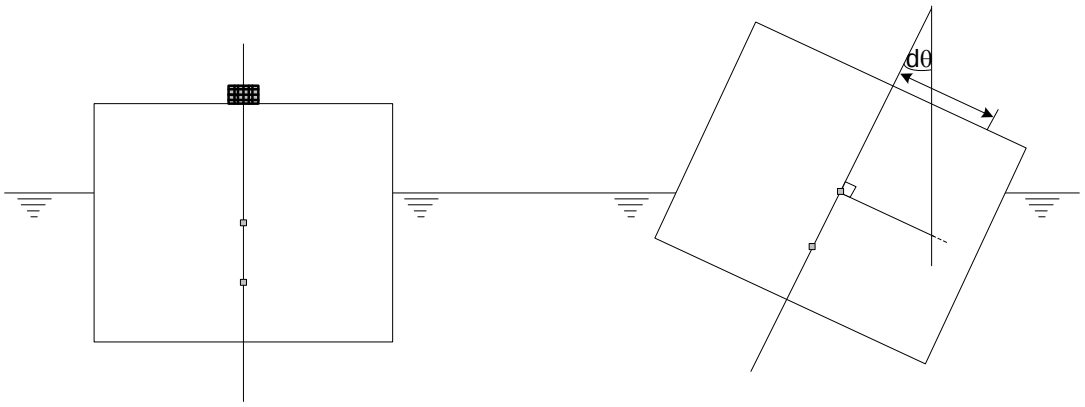
ระยะ MB คือมีรัศมีเมตาเซ็นตริค

$$MG = MB - BG$$ ----------(5.4)

ซึ่ง MG ก็คือความสูงเมตาเซ็นตริคนั่นเอง

จากสมการ 5.3 ถ้าทราบรูปร่างของวัตถุลอยเช่น เรือ ก็จะหาค่า I รอบแกนทางยาวได้ เช่นเดียวกันถ้าทราบน้ำหนักของเรือก็จะหาค่า V ได้ นั่นก็คือสามารถหาค่า MB และ MG ได้

4. การหาความสูงของเมตาเซ็นตริค : MG โดยวิธีการทดลอง



ภาพที่ 5.5 แสดงการหาความสูงเมตาเซ็นตริค

จากภาพที่ 5.5 พิจารณาเรือที่มีน้ำหนักเท่ากับ W และมีน้ำหนักที่เลื่อนได้ w อยู่บนดาดฟ้าและทราบตำแหน่งของศูนย์ถ่วงหรืออยู่ที่จุด G

ในการทดลองเมื่อเลื่อนน้ำหนัก W ออกจากจุดศูนย์กลางไปทางซ้ายหรือขวาเป็นระยะทาง dx ก็จะทำให้เรือโคลงไปเป็นมุม $d\theta$ การที่เรือโคลงไปเป็นมุม $d\theta$ จะทำให้จุด G เลื่อนไปอยู่ที่จุด G' และจุด B เลื่อนไปอยู่ที่จุด B' ฉะนั้นเมื่อจดบันทึกค่า dx และ $d\theta$ ไว้และนำมาคำนวณก็จะหาค่า MG ได้ดังต่อไปนี้

Moveab

เมื่อเรือเอียงไปเป็นมุม θ จะได้

$$\tan GE = GG' / EE'$$

$$W.GG' = w.dx$$

$$W.MG.\tan d\theta = w.dx$$

$$MG = \frac{w}{W} \times \frac{dx}{d\theta}$$

โดยการทำการทดลองหลาย ๆ ครั้ง ก็จะได้ค่า MG ต่าง ๆ กัน นำค่าเหล่านี้มาเปรียบเทียบกับที่คำนวณได้ตามทฤษฎี (สมการ 5.4)

C
E

วิธีการทดลอง

1) ชั่งน้ำหนักทั้งหมดของเรือพร้อมน้ำหนักเลื่อนได้ (Jokey Weight) จดไว้ วัดระยะความยาว (l) ความกว้าง (b) และความลึก (d) ของเรืออย่างละเอียดและจดไว้เช่นกัน เลื่อนน้ำหนักให้ปรับจุด G บนเสากระโดงให้ห่างจากท้องเรือ 350 มิลลิเมตร

2) นำเรือมาถ่วงหาจุดศูนย์ถ่วง G โดยการวางอยู่บนล้นบางดังภาพที่ 5.6 จดระยะ GZ

3) แช่เรือลงในอ่างน้ำนิ่งและเลื่อนน้ำหนักเลื่อนได้ที่ตำแหน่งศูนย์และปรับมุมที่อ่านได้จากลูกดิ่งเชือกห้อยน้ำหนักเป็นศูนย์ และถือเป็นปิดอ้างอิงในการอ่านค่าเรือเอียงต่อไป

4) หาระยะ s จากภาพที่ 5.5 โดยการอ่านค่า r แล้วหักออกจากค่า d แล้วจดไว้

5) เลื่อนน้ำหนักเลื่อนได้ครั้งละ 7.5 มม. แล้วอ่านค่า $d\theta$ อ่านค่า dx และ $d\theta$ จดบันทึกผล

ตารางผลการทดลอง

<u>ตารางที่ 2.1</u> ผลการทดลองการศึกษาเสถียรภาพของเรือ

น้ำหนักทั้งหมดของเรือ : _____ กก.

น้ำหนักเลื่อนได้ (Jokey Weight) : _____กก.

ส่วนต่าง ๆ ของเรือ: ความยาว (l) _____มม.

ความกว้าง (b) _____มม.

ความสูง (d) _____มม.

ความลึกจากกาบเรือถึงน้ำ : _____มม.

เรือกินน้ำลึก (s) : _____มม.

ผลการทดลอง	การทดลองครั้งที่				
	1	2	3	4	5
ความสูงน้ำหนักบเสากระโดง (มม.)					
GZ (มม.)					
Dx (ม.) 0.0 7.5 15.0 22.5 30.0	$d\theta$	$d\theta$	$d\theta$	$d\theta$	$d\theta$

ผลการทดลอง	การทดลองครั้งที่				
	1	2	3	4	5
ความสูงน้ำหนักบเสากระโดง (มม.)					
GZ (มม.)					
Dx (ม.)	dθ	dθ	dθ	dθ	dθ
37.5					
45.0					
52.5					
60.0					
70.0					

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง dθ กับ dx

2) วิเคราะห์ความสูงเมตาเซ็นตริก (Metacentric Height, MG) จากการเอียงของเรือและจากการวัดระยะต่าง ๆ

3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจุดศูนย์ถ่วงเรือ (GZ) กับความสูงเมตาเซ็นตริก (MG)

เอกสารอ้างอิง

โครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2549. **คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ EGCE 322 Hydraulic Engineering Laboratory**.

ไตรรัตน์ ศรีวัฒนา, ชูเกียรติ ทรัพย์ไพศาล และพงษ์ศักดิ์ เสริมสาธนสวัสดิ์. 2524. **ปฏิบัติการทางชลศาสตร์**. เอกสารวิชาการ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิมิตร เฉิดฉันท์พิพัฒน์. **ปฏิบัติการกลศาสตร์ของของไหล**. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Essom Company Limited. 1999. **Technical Training Equipment**.

บทปฏิบัติการที่ 6

การไหลผ่านฝายสันคมและรูระบาย
(Flow over Sharp-Crested Weir and Orifice)

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การไหลผ่านฝายสันคมและการไหลผ่านรูระบาย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การไหลผ่านฝายสันคม (Flow Over Sharp-Crested Weir)

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำผ่านช่องทางน้ำที่มีฝายสันคมรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม (U-Notch) และสามเหลี่ยม (V-Notch) ติดตั้งอยู่ กับค่าความลึกของน้ำเหนือระดับสันฝายนั้น รวมทั้งศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านสันฝาย

อุปกรณ์และเครื่องมือ

ชุดทดลองการไหลผ่านฝายสันคมจะต้องนำมาใช้ร่วมกับโต๊ะชลศาสตร์ซึ่งประกอบด้วย

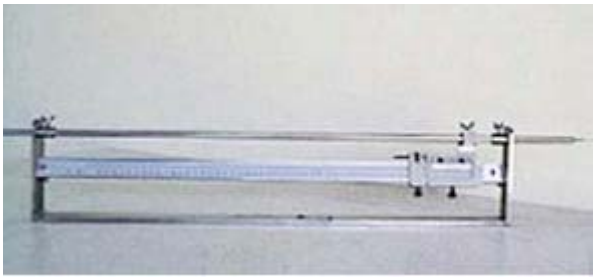
1) แผ่นกั้นซึ่งเป็นฝายสันคมบากเป็นช่องทางน้ำไหลล้นข้ามเป็นรูปตัววี (เรียกว่า V-Notch Weir) ขนาดของมุมเป็น 60 องศา และ 90 องศา

ภาพที่ 6.1 ฝายสันคมบากรูปตัววี (V-Notch Weir)

2) แผ่นกั้นฝายสันคมบากเป็นช่องทางน้ำล้นข้ามขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตรเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (U-Notch)

ภาพที่ 6.2 ฝายสันคมบากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (U-Notch Weir)

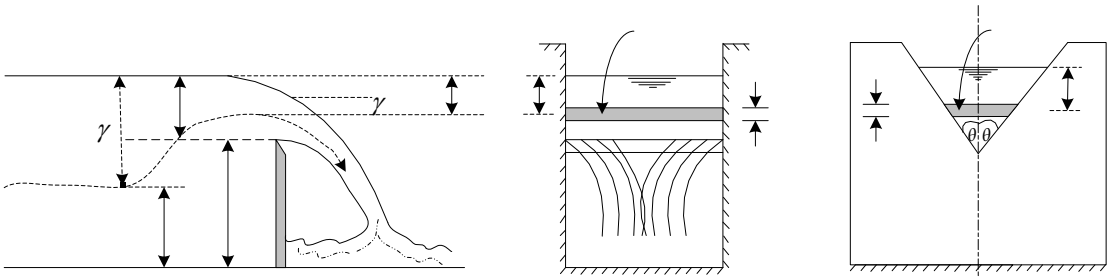
3) Hook Gauge และ Point Gauge เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับวัดระดับน้ำ อ่านได้ละเอียดถึง 0.05 มิลลิเมตร



ภาพที่ 6.3 Hook Gauge และ Point Gauge

4) นาฬิกาจับเวลา

ทฤษฎี



ภาพที่ 6.1 การไหลผ่านฝายสันคม

จากภาพที่ 6.1a ถ้าใช้สมการ Bernoulli ระหว่างจุด (1) และ (2) และไม่คิดการสูญเสียพลังงาน

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

ตั้งเงื่อนไขว่าน้ำที่ไหลล้นข้ามสันฝายจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางมีความลึกไม่มาก (จุด 2) ดังนั้นความดันที่จุด (2); p_2 มีค่าใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ หรือ $p_2 \approx 0$ (Gauge) และที่จุด (1) ความเร็วของการไหลมีค่าไม่มากนัก เทอม $\frac{v_1^2}{2g}$ จึงมีค่าน้อยไม่นำมาคิด สมการ Bernoulli ระหว่างจุด (1) กับ (2) จึงเป็น

$$\frac{p_1}{\gamma} + 0 + z = 0 + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

หรือ

$$H_w + H = \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

$$\frac{v_2^2}{2g} = H_w + H - z_2$$

จะได้

$$\frac{v_2^2}{2g} = h$$

$$v_2 = \sqrt{2gh} \qquad \text{----------(6.1)}$$

ในที่นี้ h เป็นค่าความลึกวัดจากผิวน้ำมายังจุดความลึกใด ๆ ของน้ำบริเวณสันฝาย พิจารณารูปที่ 1 (b) เป็นรูปด้านหน้ากรณีฝายเป็นสี่เหลี่ยม (U-Notch) ถ้ากำหนดให้ dA เป็นพื้นที่หน้าตัดส่วนเล็ก ๆ ของการไหลข้ามสันฝายจะได้

$$dA = bdh$$

เมื่อ

b = ความกว้างของสันฝาย

dh = ความลึกส่วนเล็ก ๆ ของการไหลข้ามสันฝาย

จาก $dQ = v.dA$

เมื่อ

dq = อัตราการไหลส่วนเล็ก ๆ ที่พิจารณา

แทนค่า $dQ = \sqrt{2gh}.dA$

$$Q = \int_0^H \sqrt{2gh}.b.dh = \frac{2}{3}\sqrt{2g}.bH^{3/2} \quad \text{----------(6.2)}$$

สมการที่ 6.2 เป็นสูตรคำนวณอัตราการไหลผ่านฝายสันคมสี่เหลี่ยมกรณีการไหลทางด้านท้ายน้ำของสันฝายไม่รบกวนสภาพการไหลทางด้านเหนือน้ำ หรือที่เรียกว่าการไหลแบบอิสระ (Free Flow) แต่สูตรดังกล่าวได้วิเคราะห์ขึ้นมาจากสมมติฐานที่ไม่ได้นำผลกระทบเรื่องการสูญเสียพลังงานมาคิด ทำให้ค่าอัตราการไหลยังไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง เพื่อที่จะให้ได้ค่าตรงตามความเป็นจริงจะต้องปรับแก้ด้วยการคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งเรียกว่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านสันฝาย (Discharge Coefficient, C_D) ดังนั้นสมการที่ 6.2 จะเป็น

$$Q = \frac{2}{3}C_D\sqrt{2g}.bH^{3/2} \quad \text{----------(6.3)}$$

ในกรณีเป็นฝายสันคมรูปตัว V พิจารณาตามภาพที่ 6.1c

$$dA = 2(H-h)\tan\theta.dh$$

$$dQ = v.dA$$

$$dQ = \sqrt{2gh}.2(H-h)\tan\theta.dh$$

$$Q = 2\int_0^H \sqrt{2gh}(H-h)\tan\theta.dh$$

$$Q = \frac{8}{15}\sqrt{2g}.\tan\theta.H^{5/2} \quad \text{----------(6.4)}$$

สมการที่ 6.4 เป็นการคำนวณอัตราการไหลทางทฤษฎี ต้องปรับแก้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านฝายรูปตัว v ดังนั้นสมการที่ 6.4 จะเป็น

$$Q = \frac{8}{15} C_D \sqrt{2g}.\tan\theta.H^{5/2} \qquad \text{----------(6.5)}$$

ในทางปฏิบัติ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของแต่ละชนิดฝายสามารถหาได้จาก

$$C_D = \frac{Q_{(Measured)}}{Q_{(Theory)}}$$

หรือ

$$C_{D(U-Notch)} = \frac{Q_{(Measured)}}{\frac{2}{3}\sqrt{2g}.bH^{3/2}} \qquad \text{----------(6.6)}$$

$$C_{D(V-Notch)} = \frac{Q_{(Theory)}}{\frac{8}{15}\sqrt{2g} \times \tan\theta \times H^{5/2}} \qquad \text{----------(6.7)}$$

อย่างไรก็ตามสามารถวิเคราะห์หาสมการคำนวณอัตราการไหลผ่ายสันฝายได้อีกวิธีหนึ่ง โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองระหว่างค่าอัตรากรไหลที่วัดได้ (Q) กับค่าที่วัดเช่นเดียวกัน จากนั้นก็อาศัยวิธีการทางสถิติที่เรียกว่า Regression Analysis วิเคราะห์ข้อมูล ก็จะได้รูปสมการอัตราการไหล

วิธีการทดลอง

1) ติดตั้งแผ่นกั้นฝายสันคมเข้ากับโต๊ะชลศาสตร์ โดยใช้สันคมของฝายหันไปทางด้านเหนือน้ำขันสลักเกลียวเพื่อยึดแผ่นดังกล่าวให้แน่นจนกระทั่งน้ำไม่สามารถไหลลอดออกมาได้ เริ่มทำการทดลองโดยใช้ฝายรูปตัววี มุม 60 องศา

2) ติดตั้ง Hook Gauge และ Point Gauge ห่างไปทางด้านเหนือน้ำของฝายสักเล็กน้อย

3) เปิดเครื่องปั้มน้ำ ค่อย ๆ เปิดวาล์วควบคุมน้ำให้น้ำไหลสู่รางน้ำ ปรับวาล์วจนระดับน้ำในรางน้ำมีระดับสูงกว่าจุดต่ำสุดของสันฝายเพียงเล็กน้อย จากนั้นเปิดเครื่องสูบน้ำรอจนให้น้ำในรางน้ำไหลล้นข้ามสันฝายไปเองจนน้ำหยุดไหล ซึ่งได้รับระดับน้ำในรางน้ำขณะที่อยู่ระดับเดียวกันระดับต่ำสุดของสันฝายใช้ Hook Gauge หรือ Point Gauge อ่านค่าระดับน้ำนี้ไว้ บันทึกลงในตารางที่ 6.1 ในช่องระดับสันฝายอ่านจาก Hook Gauge

4) เปิดวาล์วระบายน้ำออกจากถังวัดปริมาตรทิ้งไว้

5) เปิดเครื่องสูบน้ำ เปิดวาล์วควบคุมน้ำในระดับหนึ่ง โดยสังเกตุจากระดับน้ำที่ไหลล้นข้ามสันฝาย เริ่มต้นจากความลึกไม่มากนัก รอจนระดับน้ำคงที่ ให้เปิดวาล์วของถังวัดปริมาตร เริ่มจับเวลาและค่าปริมาตรที่อ่านได้ พร้อมทั้งใช้ Hook Gauge อ่านค่าระดับน้ำที่ได้ บันทึกข้อมูลทั้งหมดลงในตารางที่ 6.1

6) เปิดวาล์วควบคุมน้ำจากเครื่องสูบน้ำเพิ่ม ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 4) และ 5) จนกระทั่งได้ข้อมูลไม่น้อยกว่า 8 ครั้ง แล้วจึงเปลี่ยนชนิดของฝายสันคมที่เหลือ จากนั้นทดลองตามขั้นตอนข้อ 1)-5) จนครบทุกชนิดของฝาย

ตารางผลการทดลอง

ทำการบันทึกผลในตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเรื่องการไหลผ่านฝายสันคม

ครั้งที่	ระดับสันฝายอ่านจาก Hook Gauge (มม.)	ความลึกน้ำเหนือสันฝาย,H (มม.)	ปริมาตรน้ำจากถังวัด (ลิตร)	เวลาที่จับ (วินาที)	อัตราการไหล,Q ที่วัดได้ (ลิตร/นาที)	log Q	log H	หมายเหตุ
สันฝายชนิด V-Notch มุม 60 องศา								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
สันฝายชนิด V-Notch มุม 90 องศา								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
สันฝายชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (U-Notch)								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

ตารางที่ 6.2 ผลที่ได้จากการทดลอง

ครั้งที่	สันฝายชนิด V-Notch มุม 60 องศา		สันฝายชนิด V-Notch มุม 90 องศา		สันฝายชนิสี่เหลี่ยมผืนผ้า (U-Notch)		หมายเหตุ
	Q จากการวัด (ลิตร/นาที)	C_D	Q จากการวัด (ลิตร/นาที)	C_D	Q จากการวัด (ลิตร/นาที)	C_D	
ค่าที่คำนวณได้จาก Regression Analysis	ค่า K = _____ ค่า n = _____		ค่า K = _____ ค่า n = _____		ค่า K = _____ ค่า n = _____		

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) พล๊อตกราฟระหว่างค่า Q ที่วัดได้กับค่า H ในแต่ละชนิดของฝาย

2) นำค่า Q ที่วัดได้กับค่า H ของแต่ละชนิดของฝายมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ โดยวิธี Regression Analysis โดยสมมติว่าสัมพันธ์ระหว่าง Q กับค่า H อยู่ในรูป $Q = KH^n$ จากวิธีการทางสถิติจะสามารถหาค่า K และ n ได้ บันทึกข้อมูลที่วิเคราะห์ลงในตารางที่ 6.2

3) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (Coefficient of Discharge, C_D) ของแต่ละค่าของการไหล โดยใช้สมการที่ 6.6, 6.7 บันทึกลงในตารางที่ 6.2

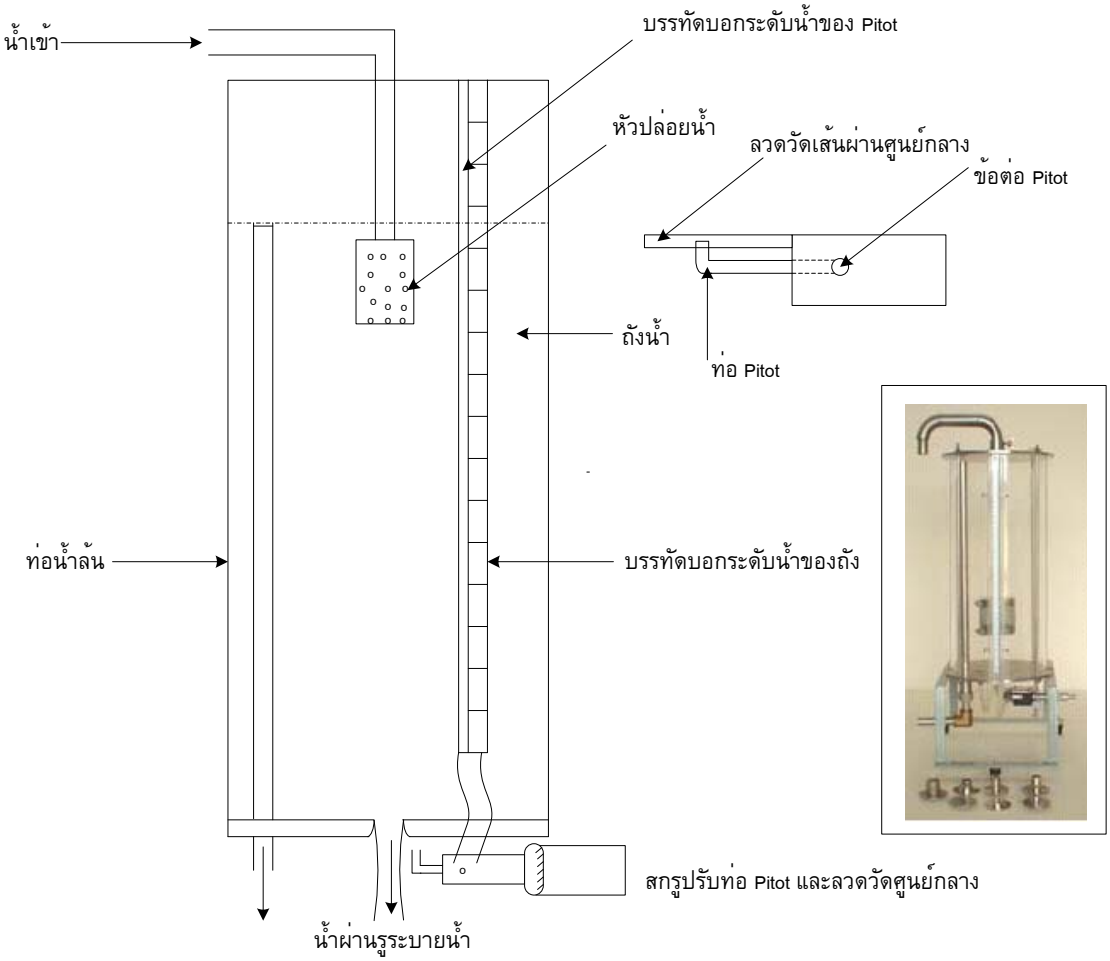
2. การไหลผ่านรูระบาย (Flow Through an Orifice)

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงลักษณะหน้าตัดของการไหลเมื่อมีการไหลผ่านรูระบาย (Orifice) ออกมา และศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ที่เกี่ยวข้องในการไหลผ่านรูระบาย

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ชุดทดลองการไหลผ่านรูระบายมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ทำด้วยพลาสติกใส ด้านล่างบริเวณก้นถังมีรูระบายน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ด้านข้างมีสเกลสำหรับอ่านค่าความลึกของน้ำ (H_o) ด้านบนของถังมีหัวปล่อยน้ำเข้าถัง หัวปล่อยน้ำนี้ปรับค่าความสูง-ต่ำได้ ภายในถังมีท่อระบายน้ำล้นเพื่อใช้ควบคุมระดับน้ำในถัง บริเวณด้ายล่างของรูระบายน้ำมีอุปกรณ์อยู่ 2 ชนิดคือ อุปกรณ์สำหรับใช้วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำน้ำ บริเวณ Vena Contracta ตามภาพที่ 6.1

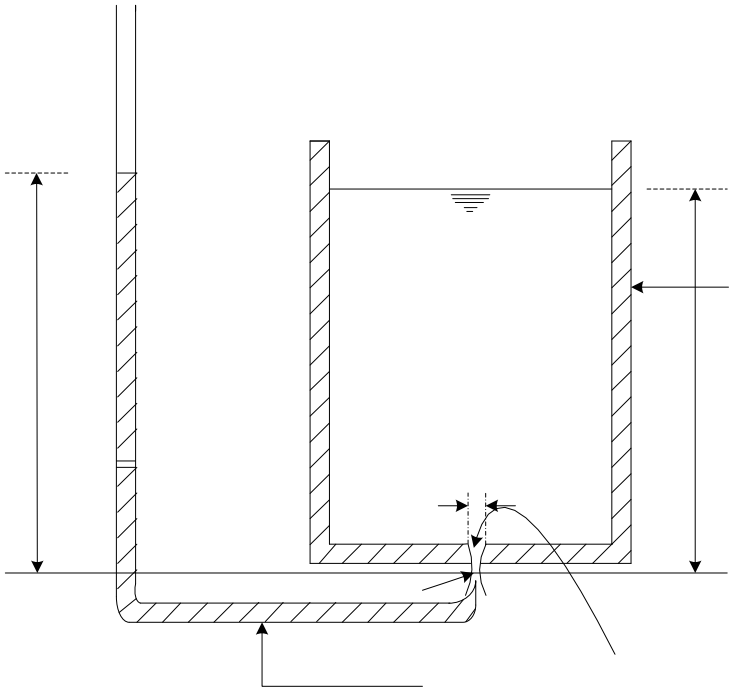


ภาพที่ 6.1 ชุดทดลองการไหลผ่านรูระบาย

2) ชุดทดลองนี้ใช้ร่วมกับโต๊ะชลศาสตร์

ทฤษฎี

ในการไหลของของไหลจากพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ผ่านรูระบาย (Orifice) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเล็กลงอย่างทันทีทันใด ลำของของไหลเมื่อไหลผ่านรูระบายจะไม่มีขนาดเท่ากับหน้าตัดของรูระบายแต่จะมีขนาดเล็กกว่า เรียกปรากฏการณ์ลักษณะนี้ว่า Vena Contracta ลักษณะดังภาพที่ 6.3



ภาพที่ 6.3 ปรากฏการณ์ Vena Contracta เมื่อมีการไหลผ่านรูระบาย

ตามภาพที่ 6.3 ลำของของไหลเมื่อไหลผ่านรูระบายที่มีพื้นที่หน้าตัด A_o เมื่อไหลผ่านเลยรูระบายลงมา ลำของไหลจะกิ่วตัวคอดเล็กลงกว่าพื้นที่หน้าตัดรูระบาย โดยมีพื้นที่หน้าตัดเป็น A_c ถ้าหากวิเคราะห์การไหลโดยใช้สมการเบอร์นูลี ระหว่างจุด (1) กับ (2) ตามภาพที่ 6.3 โดยไม่คิดการสูญเสียพลังงาน จะได้

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \qquad \text{----------(6.8)}$$

เมื่อ

p_1 = 0 (ความดันบรรยากาศ)

p_2 ≈ 0 (เนื้อที่การไหลค่อนข้างเล็กมีสภาพใกล้เคียงความดันบรรยากาศ)

$\frac{v_1^2}{2g}$ ≈ 0 (ถือว่าที่จุด 1 ความเร็วมีค่าไม่มากนัก)

กำหนดเส้นระดับอ้างอิง (Datum Line) ไว้ที่จุด (2) ดังนั้นสมการ 6.8 จะเป็น

$$0 + 0 + Z_1 - Z_2 = 0 + \frac{v_2^2}{2g}$$

หรือ $$H_0 = \frac{v_2^2}{2g}$$

หรือ $$v_{2T} = \sqrt{2gH_0} \qquad \text{----------(6.9)}$$

อัตราการไหลตามทฤษฎี;

$$Q_T = A_0 v_{2T} = A_0\sqrt{2gH_0} \qquad \text{----------(6.10)}$$

สมการ 6.10 เป็นอัตราการไหลทางทฤษฎี และยังไม่ตรงกับความเป็นจริงเพราะในการวิเคราะห์ไม่ได้นำค่าการสูญเสียพลังงานมาคิด และใช้พื้นที่หน้าตัดของรูระบายแทนพื้นที่หน้าตัดบริเวณ Vena Contracta ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดเฮดรวมที่แท้จริง (คิดการสูญเสียพลังงานแล้ว) บริเวณ (2) โดยใช้อุปกรณ์ชนิด Pitot Tube ระดับน้ำในหลอด Pitot จะเป็นตัวบอกค่าเฮดที่จุด (2) สมมติอ่านค่าได้เป็น H_c และยังสามารถวัดเพื่อหาค่า A_c ได้ ดังนั้นถ้าแทน H_o ด้วย H_c แทน A_o ด้วย A_c ลงในสมการ 6.10 Q ที่ได้จะเป็น Q ที่แท้จริง นั่นคือ

$$Q_c = A_c\sqrt{2gH_c} \qquad \text{----------(6.11)}$$

เมื่อ

A_c = พื้นที่หน้าตัดการไหลบริเวณที่เป็น Vena Contracta

H_c = เฮดของน้ำที่อ่านจาก Pitot Tube

ค่าอัตราการไหลระหว่างส่วนพื้นที่หน้าตัดของการไหลบริเวณ Vena Contracta (A_c) กับพื้นที่หน้าตัดของรูระบาย (A_o) จะเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการหดตัด (Coefficient of Contraction, C_C) หรือ

$$C_c = \frac{A_c}{A_0} \qquad \text{----------(6.12)}$$

จากสมการ 6.9 ค่า v_{2T} เป็นความเร็วของการไหลทางทฤษฎี ซึ่งยังไม่ถูกต้องตามความเป็นจริงเพราะการวิเคราะห์ไม่ได้นำค่าการสูญเสียพลังงานมาคิด ซึ่งค่าความเร็วของการไหลที่จุด (2) ที่ถูกต้องจะเป็น

$$v_{2c} = \sqrt{2gH_c} \qquad \text{----------(6.13)}$$

ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วที่ถูกต้องกับค่าความเร็วที่วิเคราะห์จากทฤษฎีเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของความเร็ว (Coefficient of Velocity, C_v) หรือ

$$C_v = \frac{v_{2c}}{v_{2T}} = \frac{\sqrt{2gH_c}}{\sqrt{2gH_0}} = \sqrt{\frac{H_c}{H_0}} \qquad \text{----------(6.14)}$$

เช่นเดียวกันค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลที่แท้จริงผ่ารูระบาย กับอัตราการไหลที่วิเคราะห์จากทฤษฎี เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านรูระบาย (Coefficient of Discharge Through Orifice, C_D) หรือ

$$C_D = \frac{Q_c}{Q_T} = \frac{A_c\sqrt{2gH_c}}{A_c\sqrt{2gH_0}} \qquad \text{----------}$$

(6.15)

วิธีการทดลอง

เมื่อทำการทดลองประกอบชุดทดลองเข้ากับโต๊ะชลศาสตร์เรียบร้อบแล้วให้ดำเนินการทดลองเป็น 2 ตอน

<u>ตอนที่ 1</u> ทดลองที่ค่า H_o คงที่

1) เปิดน้ำจากปั๊มเข้าถังทรงกระบอกปล่อยน้ำ ให้ได้ความลึกของน้ำภายในถังทรงกระบอกเพียงพอแก่การทดลอง น้ำควรท่วมหัวปล่อยน้ำสักเล็กน้อย เพื่อให้อ่านค่าระดับน้ำได้ง่าย ปรับท่อน้ำล้นให้มีน้ำไหลล้นเข้าท่อเพียงเล็กน้อย รอจนระดับน้ำคงที่จึงเริ่มบันทึกค่า H_o, วัดปริมาตรน้ำจับเวลาจากโต๊ะชลศาสตร์ วัดค่า H_C โดยใช้ท่อ Pitot Tube และวัดค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของลำน้ำบริเวณ Vena Contracta บันทึกข้อมูลลงในตารางที่ 6.3 ตอนที่ 1

2) เปิดวาล์วควบคุมปริมาณน้ำเข้าสู่ถังทรงกระบอกเพิ่ม ปรับระดับของท่อน้ำล้นเพื่อควบคุมให้ค่า H_o มีค่าเท่าเดิม รอจนระดับน้ำคงที่จึงจดบันทึกข้อมูลเหมือนข้อ 1)

3) เปิดวาล์วเพิ่มปริมาณน้ำไปอีกให้ได้อย่างน้อย 5 ค่า ทำการทดลองและบันทึกข้อมูลเหมือนข้อ 1)

ตอนที่ 2 ทดลองที่ค่า H_o แปรเปลี่ยน

4) ทำการทดลองโดยแต่ละครั้งให้เปลี่ยนค่าความลึกของน้ำในถัง (H_0) ไปเรื่อย ๆ และในแต่ละครั้งวัดค่า H_0, H_C วัดปริมาตรและจับเวลา วัดเส้นผ่านศูนย์กลางลำน้ำ พร้อมกับบันทึกลงในตารางที่ 6.3 ตอนที่ 2

5) ทำการทดลองให้ได้อย่างน้อย 7 ครั้งขึ้นไป

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 6.3 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเรื่องการไหลผ่านฝายสันคม

ครั้งที่	ปริมาตรน้ำที่วัด (ลิตร)	เวลาที่จับ (วินาที)	H_o (มม.)	H_C (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางลำน้ำ (มม.)	หมายเหตุ
ตอนที่ 1 การทดลองที่ H_o มีค่าคงที่						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
ตอนที่ 2 การทดลองที่ H_o มีค่าแปรเปลี่ยน						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

ตารางที่ 6.4 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ครั้งที่	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	A_0 (มม.^{2})	A_C (มม.^{2})	C_{D1}	C_{D2}	C_V	C_C	หมายเหตุ
ตอนที่ 1 การทดลองที่ H_o มีค่าคงที่								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
ตอนที่ 2 การทดลองที่ H_o มีค่าแปรเปลี่ยน								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณอัตราการไหลของน้ำจากข้อมูลปริมาตรน้ำและเวลาที่วัดได้ บันทึกลงในตารางที่ 6.4

2) คำนวณค่า C_D จากสมการ (h) และ C_D จาก $\frac{Q}{A_0\sqrt{2gH_0}}$ บันทึกลงในตารางที่ 6.4

3) คำนวณค่า C_V จากสมการ (g) บันทึกค่าลงในตารางที่ 6.4

4) คำนวณค่า C_c จากสมการ (e) บันทึกค่าลงในตารางที่ 6.4

เอกสารอ้างอิง

โครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2549. **คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ EGCE 322 Hydraulic Engineering Laboratory**.

ไตรรัตน์ ศรีวัฒนา, ชูเกียรติ ทรัพย์ไพศาล และพงษ์ศักดิ์ เสริมสาธนสวัสดิ์. 2524. **ปฏิบัติการทางชลศาสตร์**. เอกสารวิชาการ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิมิตร เฉิดฉันท์พิพัฒน์. **ปฏิบัติการกลศาสตร์ของของไหล**. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Essom Company Limited. 1999. **Technical Training Equipment**.

บทปฏิบัติการที่ 7

การทดสอบการทำงานของเครื่องสูบน้ำ
(Performance Test of Multi-Pump Set)

วัตถุประสงค์

คำนวณหาอัตราการไหลสำหรับปั๊มแบบต่าง ๆ ได้แก่ ปั๊มแบบหอยโข่ง (Centrifugal Pump) ปั๊มสูบชัก (Reciprocating Pump) ปั๊มเทอร์ไบน์ (Turbine Pump) ปั๊มการไหลตามแนวแกน (Axial Flow Pump) และปั๊มหอยโข่งชนิดหลายใบพัด (Centrifugal Pump-Impeller) รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความดัน และความเร็วรอบ ตลอดจนเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของปั๊มแต่ละชนิด

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ชุดทดสอบปั๊มน้ำ (Multi-Pump Test Set) ตามภาพที่ 7.1 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อยที่สำคัญดังนี้คือ

-ปั๊มแบบหอยโข่ง (Centrifugal Pump) ขนาด ¾ แรงม้า ยี่ห้อ SEAR รุ่น CMP ให้น้ำได้กว่า 50 ลิตร/นาที ที่ Head 10 เมตร และความเร็วรอบ 2,900 รอบ/นาที ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 0.75 แรงม้า ยี่ห้อ SEMCO

-ปั๊มสูบชัก (Reciprocating Pump) ขนาด 0.50 แรงม้า ยี่ห้อ SPECK-KOLBENPUMPEN รุ่น PM-15 ให้น้ำได้ 15 ลิตร/นาที ที่ 300 รอบ/นาที ขับด้วยมอเตอร์เกียร์ขนาด 1 แรงม้า ยี่ห้อ NORD

-ปั๊มเทอร์ไบน์ (Turbine Pump) ขนาด 0.50 แรงม้า ยี่ห้อ SEAR รุ่น KF-1 ให้น้ำได้กว่า 25 ลิตร/นาที ที่ 2,900 รอบ/นาที ที่ Head 10 เมตร ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 0.75 แรงม้า ยี่ห้อ SEMCO

-ปั๊มการไหลตามแนวแกน (Axial Flow Pump) ยี่ห้อ ESSOM รุ่น AFP 65 ให้อัตราการไหลกว่า 300 ลิตร/นาที ที่ Head 1 เมตร ที่ 2,900 รอบ/นาที ขนาดท่อ 2.5 นิ้ว ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 0.75 แรงม้า ยี่ห้อ SEMCO

-ปั๊มหอยโข่งชนิดหลายใบพัด (Multistage Centrifugal Pump) ยี่ห้อ SEAR รุ่น FC-20/2A ให้น้ำได้กว่า 60 ลิตร/นาที ที่ Head 20 เมตร และความเร็วรอบ 2,900 รอบ/นาที ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ยี่ห้อ SEMCO

-เครื่องปรับรอบเป็นแบบปรับความถี่ (Inverter) ขนาด 2KVA ยี่ห้อ MIKI ใช้ไฟ 220 โวลต์ 1 เฟส 50 เฮิร์ตซ์

-มีอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของปั๊มแบบไหลตามแกนเป็นแบบตัวเลขยี่ห้อ SIGNET รุ่น 8512 หัววัดยี่ห้อ SIGNET รุ่น 2536

-เครื่องวัดรอบเป็นแบบตัวเลขชนิดหน้าปัทม์ ยี่ห้อ RED LION รุ่น IMI

-มีอุปกรณ์วัดแรงบิดของปั๊มเป็นแบบตัวเลข ยี่ห้อ FENWAL รุ่น AR-42L หัววัด ยี่ห้อ TRANTRONIC รุ่น FAD-15

-เกจวัดความดันของน้ำทั้งท่อดูดและท่อส่งของปั๊มแบบหอยโข่ง ปั๊มแบบสูบชัก และปั๊มเทอร์ไบน์ เป็นแบบ BOURDON ส่วนปั๊มแบบไหลตามแนวแกนเป็นแนนมาโนมิเตอร์ปรอท

-มาตรวัดน้ำขนาดวัดได้ละเอียด 0.1 ลิตร ยี่ห้อไทยไอชิ รุ่น PXA 25

-ถังวัดปริมาตรขนาดความจุ 80 ลิตร

-ถังเก็บน้ำขนาดความจุ 300 ลิตร

-ระบบท่อทำด้วยสแตนเลส

-ตู้สวิทซ์คอนโทรล พร้อมชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์ เครื่องวัดรอบ อุปกรณ์วัดแรงหมุน

-ชุดทดลองทั้งหมด มีฐานรองสำหรับวางบนโต๊ะโครงเหล็กมีล้อเลื่อน

2) น้ำสะอาด

ภาพที่ 7.1 ชุดทดสอบปั๊มน้ำ

ทฤษฎี

- การแยกประเภทปั๊ม

ปั๊ม หรือ เครื่องสูบ อาจให้คำจำกัดความได้ว่า เป็นเครื่องมือกลที่ทำหน้าที่เพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว เพื่อให้ของเหลวนั้นไหลผ่านระบบท่อปิดจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ตามความต้องการ พลังงานที่นำมาเพิ่มให้แก่ของเหลวนั้นอาจได้มาจากเครื่องยนต์ มอเตอร์ แรงลม แรงคน หรือพลังงานแหล่งอื่นๆ ก็ได้

การแยกประเภทปั๊มอาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบด้วยกันคือ

1. แยกตามลักษณะการเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว หรือการไหลของของเหลวในปั๊ม ซึ่งได้แก่

ก. ประเภทเซนตริฟูกอล (Centrifugal) เพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

ข. ประเภทโรตารี่ (Rotary) เพิ่มพลังงานโดยอาศัยการหมุนของฟันเฟืองรอบแกนกลาง

ค. ประเภทสูบชัก (Reciprocating) เพิ่มพลังงานโดยอาศัยการอัดโดยตรงในกระบอกสูบ

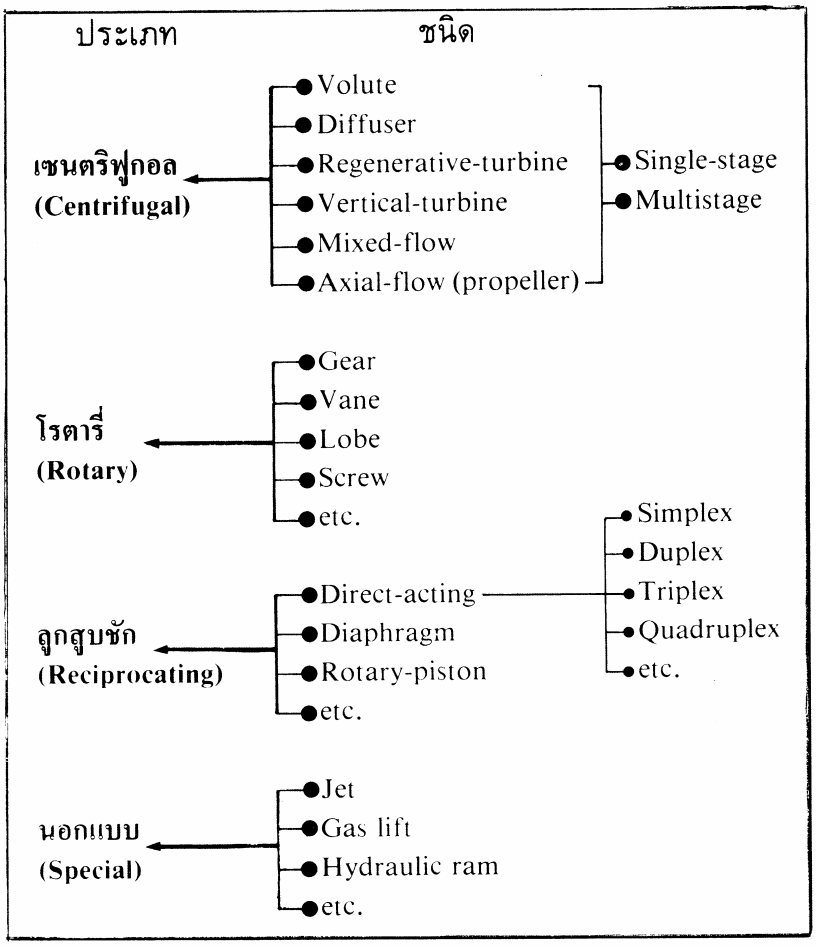
ง. นอกแบบ (Special) เป็นปั๊มที่มีลักษณะพิเศษไม่สามารถจัดให้อยู่ในสามประเภทข้างต้นได้

ในแต่ละประเภทที่กล่าวมานี้ยังมีการดัดแปลงอออกไปเป็นแบบต่างๆ อีกหลายแบบและมีชื่อเรียกของแต่ละแบบแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 7.2

2. แยกประเภทตามลักษณะการขับดันของเหลวในเครื่องสูบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ

ก. ปั๊มแบบไม่แทนที่ (Non – Positive Displacement) ทำงานโดยไม่อาศัยหลักการแทนที่ของเหลว ปกติใช้ในงานความดันต่ำ อัตราการไหลสูง ไม่สามารถรับความดันสูง ๆ ได้ ปั๊มประเภทอาศัยแรงเหวี่ยงหนีจุดศูนย์กลางอาจจัดให้อยู่ในกลุ่มนี้ได้

ข. ปั๊มแบบแทนที่ (Positive Displacement) ทำงานโดยอาศัยหลักการแทนที่ของเหลวในห้องสูบด้วยการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนของเครื่องสูบ ปั๊มชนิดนี้จะจ่ายของไหลด้วยปริมาตรที่แน่นอนค่าหนึ่ง ต่อการหมุนรอบหนึ่งของเพลา สามารถรับความดันที่สูงขึ้นในระบบได้ดี ปั๊มประเภทนี้รวมแบบโรตารี่และลูกสูบชักเข้าอยู่ในกลุ่มเดียวกัน



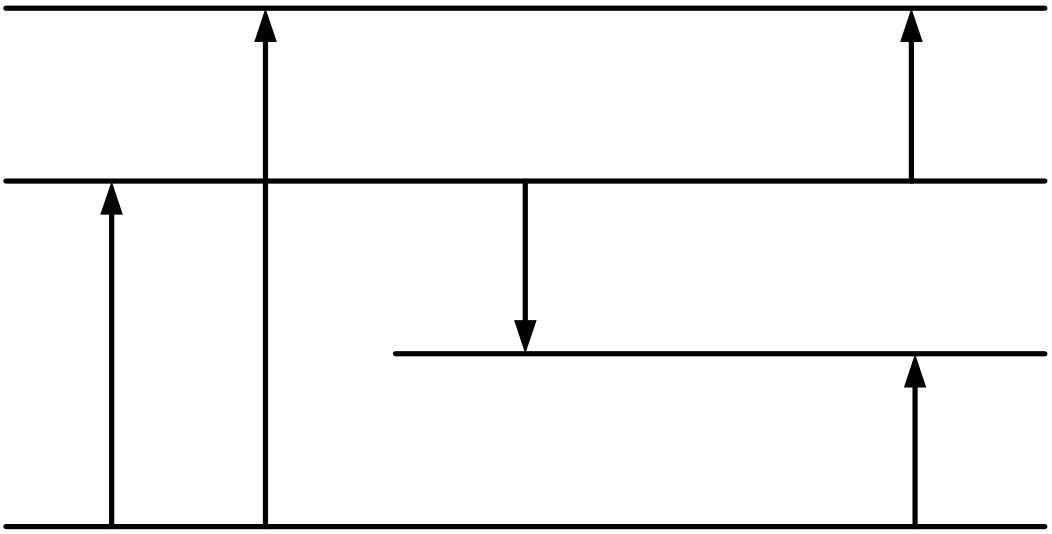
ภาพที่ 7.2 การจำแนกประเภทของปั๊ม

❑ <u>ความดันและเฮด</u>

ในการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของปั๊ม จำเป็นต้องทราบทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับของเหลว ความดัน และหัวน้ำหรือเฮดของปั๊ม ดังนี้

1. ความดันของบรรยากาศ (Atmospheric Pressure)

คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของบรรยากาศต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนผิวโลกแต่เนื่องจากว่าลักษณะการวัดความดันมี 2 แบบ ตามภาพที่ 7.3



<u>ภาพที่ 7.3</u> ความดันบรรยากาศ

จากภาพความดันของบรรยากาศมี่ค่าศูนย์อย่างแท้จริงหรือไม่มีความดันเลยซึ่งเกิดขึ้นได้โดยการดูดอากาศออกหมดจนเป็นสูญญากาศที่แท้จริงเรียกว่า ความดันศูนย์สมบูรณ์ (Absolute (Zero Pressure) ค่าความดันใด ๆ ที่วัดจากค่าความดันพื้นฐานนี้เรียกว่า ความดันสมบูรณ์ (Absolute Pressure, P_{abs}) รวมทั้งความดันของบรรยากาศซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับ 101.325 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร (kN/m^2) หรือ 14.7 ปอนด์ต่อตารางนิ้วก็เป็นความดันสมบูรณ์ด้วย แต่เนื่องจากว่าอุปกรณ์ที่ใช้วัดเรียกว่า บาโรมิเตอร์ (Barometer) ค่าความกดดันของบรรยากาศที่วัดได้จึงเรียกว่า ความดันจากบาโรมิเตอร์ (Barometer Pressure, P_b)

อุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันโดยทั่ว ๆ ไปเป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าที่แตกต่างไปจากความกดดันของบรรยากาศ ค่าที่วัดได้เรียก ความดันจากเกจ (Gauge Pressure, P_b) ซึ่งอาจมีค่าได้ทั้งบวกและลบ จากภาพจะเห็นได้ว่าสามารถเปลี่ยนความดันจากเกจให้เป็นความดันสมบูรณ์ได้โดย

ความดันสมบูรณ์ = ความดันจากบาโรมิเตอร์ + ความดันจากเกจ

$$P_{abs} = P_b + P_g$$

ค่าความกดดันของบรรยากาศหรือความกดดันจากบาโรมิเตอร์

$$P_b = 1013 - 0.1055\ EL$$

ในเมื่อ P_b เป็นความดันของบรรยากาศมีหน่วยเป็นมิลลิบาร์หนึ่งมิลลิบาร์ เท่ากับ 0.0145 ปอนด์/ตารางนิ้ว หรือคิดเป็นความสูงของแท่งน้ำที่ 4 °C ได้เท่ากับ 0.010197 เมตร และ EL เป็นระดับความสูงของพื้นผิวที่ต้องการทราบความกดดันเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง มีหน่วยเป็นเมตร

ในการคำนวณเกี่ยวกับการติดตั้งปั๊ม ค่าความกดดันของบรรยากาศที่ใช้มีหน่วยเป็นความสูงของแท่งน้ำหรือเฮดเป็นเมตรค่าดังกล่าวจะคำนวณได้จากสมการ

$$H_p = 10.33 - 0.00108EL$$

โดย H_p เป็นความกดดันบรรยากาศเทียบให้เป็นความสูงของแท่งน้ำที่ 4 °C มีหน่วยเป็นเมตร

2. เฮดความดัน (Pressure Head, H_p)

ค่าความดันนอกจากจะบอกเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เช่น นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือปอนด์ต่อตารานิ้ว (psi) แล้ว ถ้าเป็นความดันของของเหลวก็มักจะนิยมบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่จะก่อให้เกิดความดันที่กำหนดบนผิวหน้าซึ่งรองรับแท่งของเหลวนั้น ความดันซึ่งบอกเป็นแท่งวามสูงของของเหลวนี้เรียกว่า เฮดความดัน (Pressure Head)

ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน p และเฮดความดัน H_p คือ

$$H_p = \frac{p}{\gamma} = \frac{p}{\rho g}$$

เมื่อ

γ = น้ำหนักจำเพาะ
ρ = ความหนาแน่นของของเหลว
g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

3. เฮดความเร็ว (Velocity Head, H_v)

ของเหลวที่ไหลในท่อหรือทางน้ำเปิดด้วยความเร็วใด ๆ นั้นมีพลังงานจลน์อยู่พลังงานในส่วนนี้เมื่อบอกในรูปของเฮดคือ

$$H_v = \frac{v^2}{2g}$$

เมื่อ

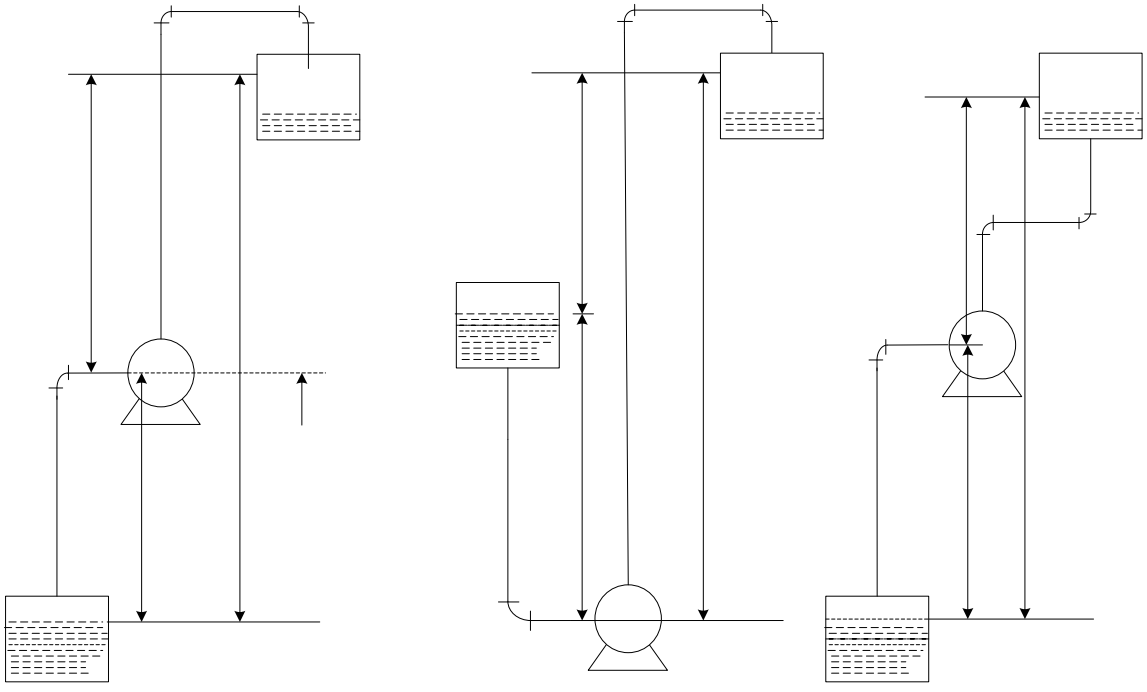
v = ความเร็วของการไหล

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

เฮดความเร็วอาจให้กำจัดความได้อีกอย่างหนึ่งว่า เป็นความสูงที่ของเหลวตกลงมาด้วยแรงดึงดูดของโลกจนได้ความเร็วเท่ากับความเร็วในการไหลของของเหลวนั้น

4. เฮดสถิตย์ (Static Head, H_s)

ในการทำงานของปั๊มโดยทั่ว ๆ ไปของเหลวจะถูกเพิ่มพลังงานเพื่อให้มันไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งซึ่งอยู่สูงกว่า ความดันซึ่งคิดเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่กระทำต่อศูนย์กลางของปั๊มทั้งทางด้านดูดและด้านจ่ายในขณะที่ความเร็วของการไหลผ่านระบบเป็นศูนย์เรียกว่า เฮดสถิตย์ (Static Head)



ภาพที่ 7.4 เฮดสถิตย์

ตามภาพระยะทางในแนวดิ่งที่บอกเป็นแท่งความสูงของของเหลว หรือเฮดจากศูนย์กลางของปั๊มถึงปลายของท่อจ่ายเรียกว่า เฮดสถิตย์ด้านจ่าย (Static Discharge Head)

ระยะจากจุดศูนย์กลางของปั๊มถึงระดับผิวของของเหลวที่ปลายของท่อดูดซึ่งอยู่สูงกว่า (ภาพที่ 7.6) เรียกว่า เฮดสถิตย์ด้านดูด (Static Suction Head) ถ้าผิวของของเหลวอยู่ต่ำกว่า (ภาพที่ a) และความดันที่ศูนย์กลางของปั๊มจะมีค่าเป็นลบ ในกรณีนี้จะเรียกว่า ระยะดูดยก (Static Suction Lift) แทน

เฮดรวมสถิตย์รวม (Total Static Head) ก็คือผลต่างทางพีชคณิตของเฮดสถิตย์ด้านจ่าย (Static Discharge Head) กับเฮดสถิตย์ด้านดูด (Static Suction Head) ค่าดังกล่าวนี้เป็นเฮดต่ำสุดที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวก่อนที่จะมีการไหลเกิดขึ้น

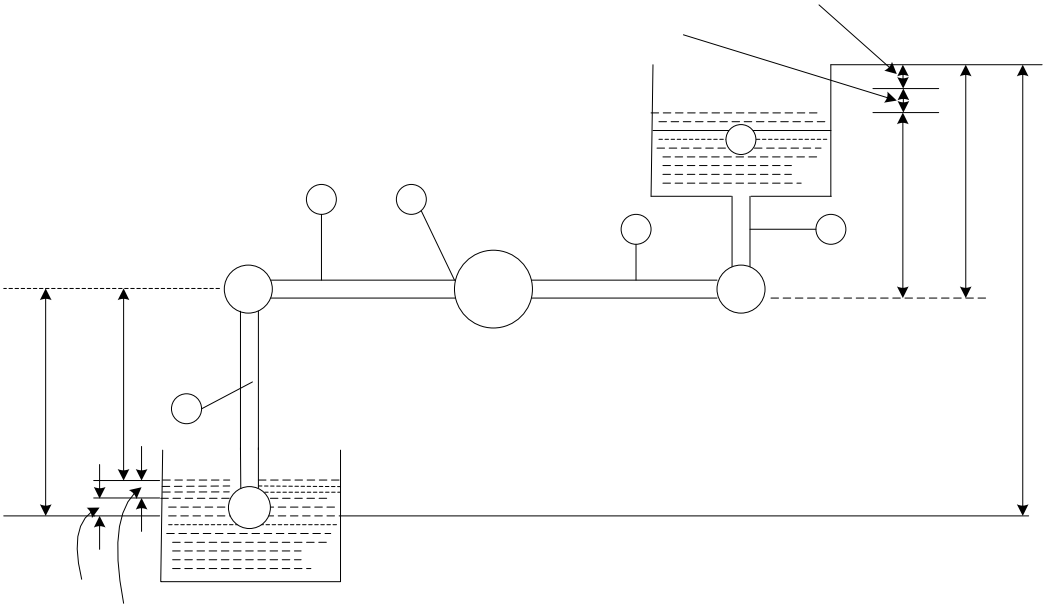
5. เฮดความฝืด (Friction Head, H_f)

ในขณะที่ของเหลวไหลผ่านระบบท่อทั้งด้านดูดและจ่ายพลังงานหรือเฮดในการไหลส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนาองจากความฝืดระหว่างของเหลวกับผนังของท่อและส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งเราเรียกว่า เฮดความฝืด (Friction Head)

ในระบบสูบน้ำโดยทั่ว ๆ ไป การเสียเฮดเนื่องจากความฝืดอาจเกิดขึ้นได้หลายจุดดังภาพข้างล่าง

การเสียเฮดทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลผ่านระบบท่อซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ดังนั้นขณะที่ปั๊มกำลังทำงาน ระยะดูดยกรวมที่เกิดขึ้นจริงจะเท่ากับระยะดูดยก (Static Suction Lift) รวมกับเฮดความฝืดทางด้านดูดทั้งหมดตั้งแต่ จุดที่ 1 ถึง จุด 5 ในกรณีที่ของเหลวทางด้านดูดอยู่สูงกว่าศูนย์กลางของปั๊ม เฮดด้านดูดรวม (Total Static Head) ที่เกิดขึ้นจริงจึงเท่ากับเฮดสถิตย์ด้านดูด (Static Suction Head)

สำหรับทางด้านจ่ายก็เช่นเดียวกัน คืออาจจะรวมการเสียเฮดที่จุดที่ 6 ถึง 9 เข้าด้วยกันเป็นเฮดความฝืด และเฮดรวมด้านจ่าย (Total Discharge Head) ที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ปั๊มการทำงานจะเท่ากับเฮดสถิตย์ด้านจ่ายรวมกับเฮดความฝืดทั้งหมดทางด้านจ่าย



ภาพที่ 7.5 การสูญเสียเฮด

จุดที่ 1 เป็นการเสียเฮดความเร็วเนื่องจากการไหลเข้าท่อ (Entrance loss) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงและอุปกรณ์ที่ปลายท่อดูด

จุดที่ 2 เป็นการเสียเฮดเนื่องจากความฝืดระหว่างของเหลวกับผนังท่อ

จุดที่ 3 เป็นการเสียเฮดเนื่องจากมีการเปลี่ยนทิศทางการไหล

จุดที่ 4 เป็นการเสียเฮดในเส้นท่อเหมือนจุดที่ 2

จุดที่ 5 เป็นการเสียเฮดที่อุปกรณ์ทางด้านดูดของปั๊มลบด้วยเฮดความฝืดทั้งหมดทางด้านดูด

สำหรับทางด้านจ่ายก็เช่นเดียวกัน คืออาจจะรวมการเสียเฮดที่จุดที่ 6 ถึง 9 เข้าด้วยกันเป็นเฮดความฝืด และเฮดรวมด้านจ่าย (Total Discharge Head) ที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ปั๊มการทำงานจะเท่ากับเฮดสถิตย์ด้านจ่ายรวมกับเฮดความฝืดทั้งหมดทางด้านจ่าย

6. เฮดรวม (Total Head, H_r)

ระยะดูดยก

ระยะดูดยกรวม

เฮดรวมของน้ำ ณ จุดใดจุดหนึ่ง ก็คือพลังงานทั้งหมดของน้ำที่แสดงออกในรูปของเฮดของน้ำ ณ จุดนั้น ๆ

2

$\therefore$ เฮดรวม = เฮดความดัน + เฮดความเร็ว + เฮดสถิตย์

$$H_r = H_p + H_v + H_s = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \times z$$

เฮดสถิตย์ = z = ความสูงของของเหลว

ความแตกต่างระหว่างเฮดรวมของ 2 จุด ในกรณีที่ไม่มีการเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว ก็คือเฮดความฝืดระหว่าง 2 จุดนั้น

ฉะนั้นเฮดควมฝืดระหว่างจุดที่ 1 และจุดที่ 2

$$H_{f12} = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} + z_1 - z_2$$

ในกรณีที่จุดที่ 1 อยู่ที่ทางเข้าของปั๊ม และจุดที่ 2 อยู่ที่ทางออกของปั๊ม เอดที่เพิ่มขึ้นก็คือเฮดที่ปั๊มให้แก่น้ำเฮดที่เพิ่มขึ้นนี้ เรียกว่า เฮดของปั๊ม (Total Dynamic Head หรือ Total Discharge Head, H_{TDH})

$$H_{TDH} = H_{T2} - H_{T1} + H_T$$

$$= \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 - \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_T$$

ในกรณีที่ H_T น้อยมากถือว่าเป็นศูนย์ และระดับทางเข้าและออกของปั๊มอยู่ในระดับเดียวกัน

$$z_1 = z_2$$

$$H_{TDH} = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

$$= H_{P2} - H_{P1} + H_{v2} - H_{v1}$$

❑ <u>กำลังงานที่มอเตอร์ให้แก่ปั๊ม และที่ปั๊มให้แก่น้ำ</u>

กำลังงานหมายถึง อัตราการทำงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา หน่วยของกำลังงานที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ แรงม้าและวัตต์ ซึ่ง 1 แรงม้า = 745.7 วัตต์ หรือนิวตันเมตรต่อวินาที หรือ 550 ฟุตปอนด์ต่อวินาที

1. กำลังงานที่มิเตอร์ให้แก่ปั๊ม วัดได้จากแรงหมุนของมอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์ดังสมการ

$$W_i = Fkg_f \times 9.81 \frac{N\,(Newton)}{kg_f} \times n \frac{rev}{min} \times 2\pi r \frac{m}{rev} \times \frac{min}{60\ (sec)}$$

$$= 1.0277\ Frn \frac{N-m}{sec}$$

$$= 1.0277\ Frn\ \ Watts$$

เมื่อ

n = ความเร็วรอบต่อนาที
F = แรงหมุนวัดที่ปลายของมอเตอร์ไดนาโมมิเตอร์ (กิโลกรัม)
r = ความยาวของแขนหมุนของไดนาโมมิเตอร์ (เมตร)
W_i = กำลังงานที่มอเตอร์ให้แก่ปั๊ม (วัตต์)

ในกรณีที่ค่าแรงหมุน T = FX_r สามารถอ่านค่าได้โดยตรงและมีหน่วยเป็นนิวตัน–เมตร

$$W_i = TN\text{-}m \times 2\pi n \frac{radian}{min}\ (\text{ไม่มีหน่วย}) \times \frac{min}{60\,sec}$$

$$= 0.10476\ Tn \frac{N-m}{sec} = 0.10476 Tn\ \ Watts$$

2. กำลังงานที่ปั๊มให้แก่น้ำหรือกำลังงานของน้ำ หาได้จากอัตราการไหลของน้ำและความดันที่เพิ่มขึ้นดังสมการ

$$W_o = P \frac{kg_f}{cm^2} \times Q \frac{lt}{min} \times 9.81 \frac{N\,(Newton)}{kg_f} \times 10^4\ \frac{cm^2}{m^2} \times \frac{m^3}{10^3 lt} \times \frac{min}{60\ sec}$$

$$= 1.635PQ\frac{N-m}{sec} = 1.635\ PQ\ Watts$$

เมื่อ

Q = อัตรการไหลของน้ำ (ลิตร-นาที)

P = ความดันที่เพิ่มขึ้น (กก./ซม.^{2})

= ความดันท่อส่ง-ความดันท่อดูด

W_o = กำลังงานที่มอเตอร์ให้กับน้ำ (วัตต์)

3. ประสิทธิภาพของปั๊ม (η)

ประสิทธิภาพของปั๊ม = พลังงานที่ปั๊มให้แก่น้ำ/พลังงานที่มอเตอร์ให้แก่น้ำ

$$\eta = \frac{W_o}{W_i}$$

❑ <u>คุณลักษณะของปั๊มแบบต่าง ๆ</u>

1. คุณลักษณะของปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal Pump)

1.1 ปั๊มเดียว

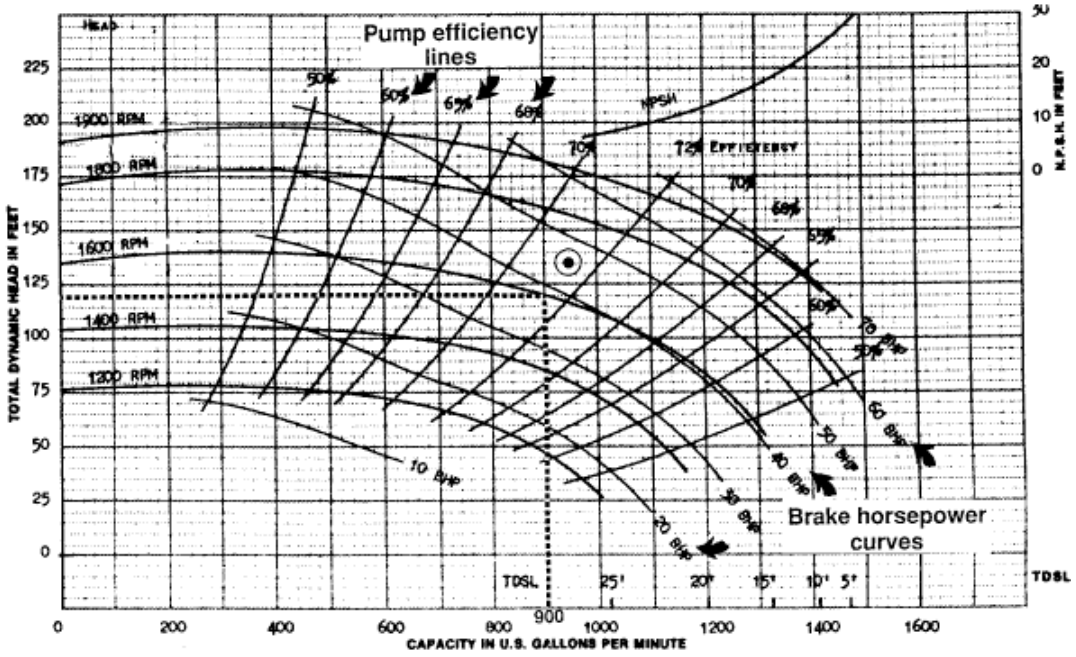
ในการทำงานของปั๊มหอยโข่ง การหมุนของใบพัดทำให้เกิดแรงเหวี่ยงไปผลักดันให้ของเหลวไหลตลอดแนวเส้นรอบวงเรือนปั๊ม จะทำหน้าที่รวบรวมของเหลวไปสู่ทางออก ทำให้ของเหลวมีเฮดรวม (Total Dynamic Head, H_{TDH}) และทางออกของของไหลออกจะทำมุม 90 องศากับทางของเหลวไหลเข้า ยิ่งใบพัดหมุนเร็วก็ยิ่งต้องใช้พลังงานมาก ทำให้เฮดสูงและของเหลวไหลมาก

ภาพที่ 7.6 ปั๊มหอยโข่ง

โดยทั่วไปการทำงานของปั๊มหอยโข่งมีหลักดังนี้

-อัตราการไหลเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบของปั๊ม
-หัวน้ำรวมเป็นอัตราส่วนกำลังสองของความเร็วรอบของปั๊ม
-พลังงานที่ใช้เป็นอัตราส่วนกำลังสามของความเร็วรอบของปั๊ม

สมรรถนะของปั๊มหอยโข่งโดยทั่วไปจะเป็นไปตามกราฟข้างล่าง



ภาพที่ 7.7 กราฟสมรรถนะการทำงานของปั๊มหอยโข่ง

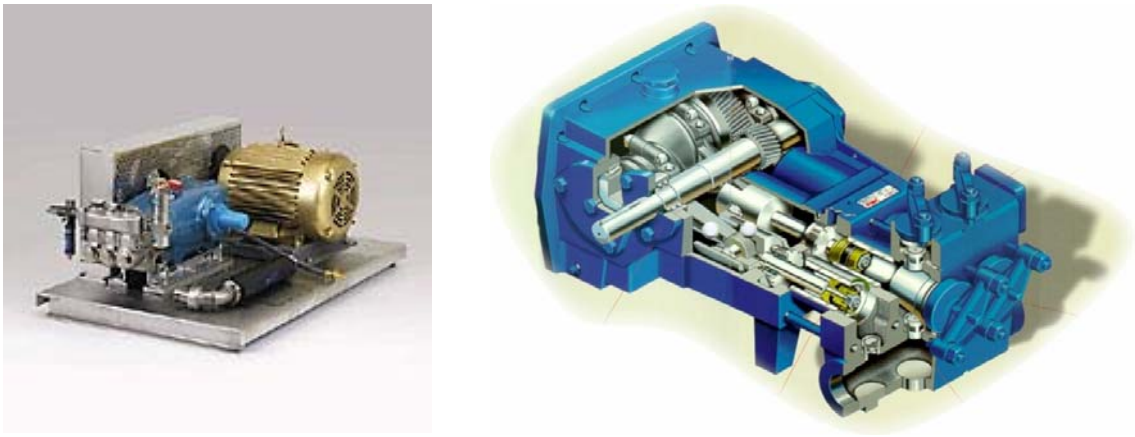
1.2 ปั๊มต่อแบบอนุกรมและขนาน

ปั๊มแต่ละตัวมีสมรรถนะการทำงานต่างกัน ในกรณีที่ปั๊ม 2 ตัวเป็นขนาดเดียวกันต่างกันที่เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเล็กจะให้หัวน้ำและปริมาณการไหลต่ำกว่าปั๊มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดโต ณ ความเร็วรอบเดียวกัน

2. คุณลักษณะของปั๊มแบบสูบชัก (Reciprocating Pump)

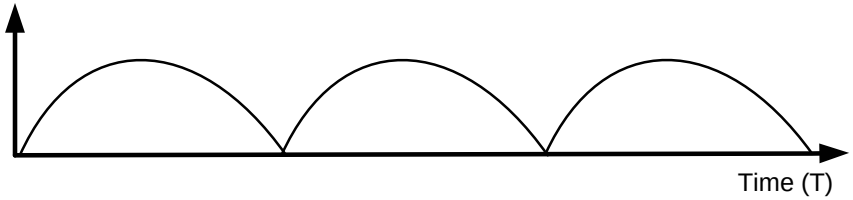
ปั๊มแบบนี้ประกอบด้วยกระบอกสูบซึ่งเคลื่อนที่ไปมาเป็นเส้นตรง โดยการหมุนของแกนซึ่งมีก้านสูบแบบเดียวกับเครื่องยนต์สูบชัก โดยการจัดระบบวาล์วปิด-เปิด ให้สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ซึ่งทำให้ของเหลวถูกดูดเข้าไปยังช่องว่างของกระบอกสูบและลูกสูบโดยผ่านวาล์วตัวหนึ่งและเมื่อลูกสูบเดินกลับ ของเหลวนี้ก็จะไหลออกไป โดยผ่านวาล์วอีกตัวหนึ่ง ทำให้สามารถผลักดันของเหลวออกไปได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังลูกสูบ

ปั๊มแบบนี้จัดอยู่ในประเภทที่ผลักดันของเหลวออกไปทางด้านจ่ายได้แน่นอน (Positive Displacement) ไม่ว่าความดันทางด้านจ่ายจะมากหรือน้อย



ภาพที่ 7.8 ปั๊มแบบสูบชัก

ปั๊มแบบนี้จะมีสมรรถนะการทำงานตามภาพข้างล่าง



ภาพที่ 7.9 กราฟสมรรถนะการทำงานของปั๊มสูบชัก

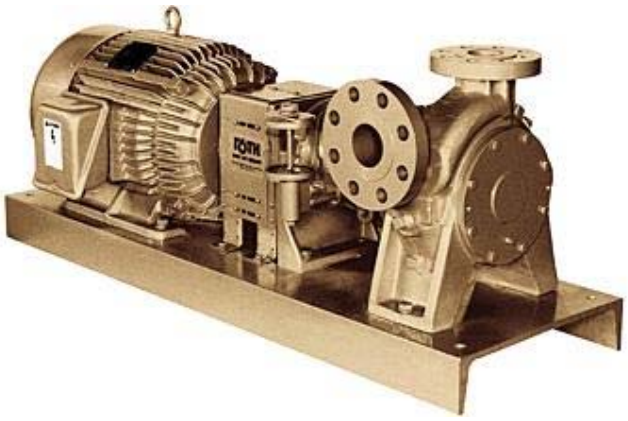
ปั๊มแบบนี้การไหลของของเหลวและความดันจะเกิดขึ้นเป็นช่วง ๆ ตามจังหวะไปมาของลูกสูบ จึงต้องมีห้องอากาศเล็ก ๆ บนหัวสูบ เพื่อให้อัตราการไหลและความดันเป็นจังหวะน้อยลง แต่เพื่อให้ความดันและอัตราการไหลสม่ำเสมอยิ่งขึ้น ชุดทดสอบนี้มีห้องอากาศที่โตอยู่ข้างนอกด้วย

การทำงานของแบบสูบชัก จะมีปริมาณของเหลวถูกผลักดัน (ไหล) ออกมาแน่นอนไม่ว่าความดันจ่ายจะมากหรือน้อย ปริมาณของเหลวที่ไหลจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบปั๊มและขนาดช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ

3. คุณลักษณะของปั๊มเทอร์ไบน์ (Regenerative Turbine Pump)

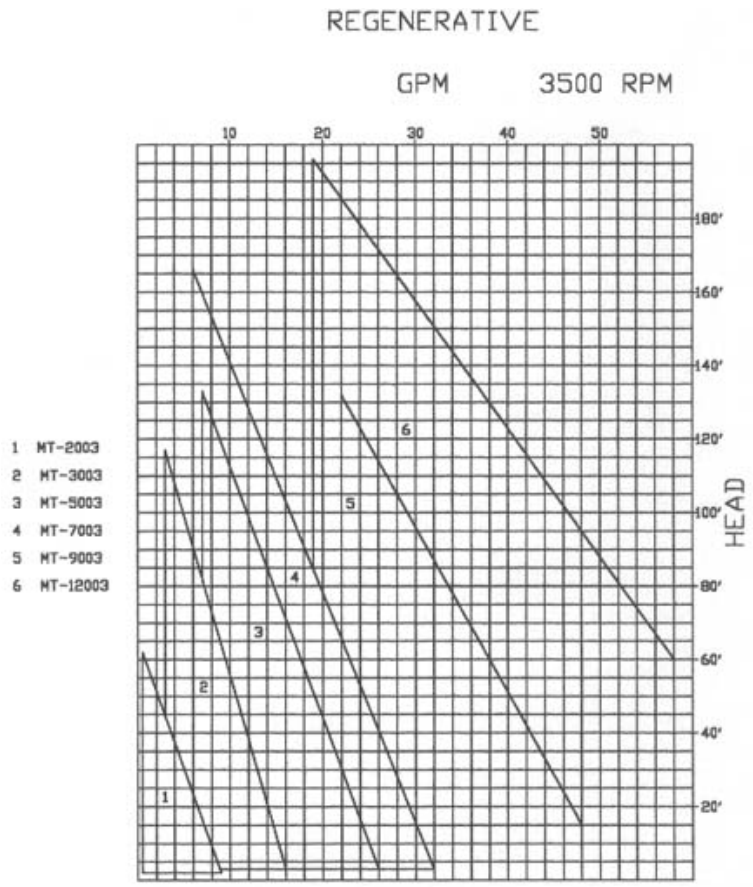
ปั๊มเทอร์ไบน์เป็นปั๊มประเภทที่ใช้แรงเหวี่ยง เช่นเดียวกับปั๊มหอยโข่งแต่ใบพัดแทนที่จะมีลักษณะก้อนหอยเหมือนปั๊มหอยโข่ง จะเป็นครีบแคบ ๆ สั้น ๆ ในแนวรัศมีทางน้ำไหลเข้าและออกจะอยู่ในระนาบเดียวกัน ตามข้างล่าง

ขณะใบพัดหมุนแรงเหวี่ยงของน้ำจะทำให้น้ำไหลออกไปจากครีบของใบพัดด้านท่อออก และเมื่อครีบใบพัดหมุนวนมาทางด้านท่อดูดน้ำก็จะไหลเข้าไประหว่างครีบของใบพัดและแรงเหวี่ยงก็จะให้น้ำที่ไหลเข้าไปนี้ไหลออกทางด้านท่อออกอีกและติดต่อไปเรื่อย ๆ



ภาพที่ 7.10 ปั๊มเทอร์ไบน์

กราฟสมรรถนะการทำงานของปั๊มเทอร์ไบน์ก็คล้ายกับปั๊มก้นหอยโข่งตามภาพข้างล่าง

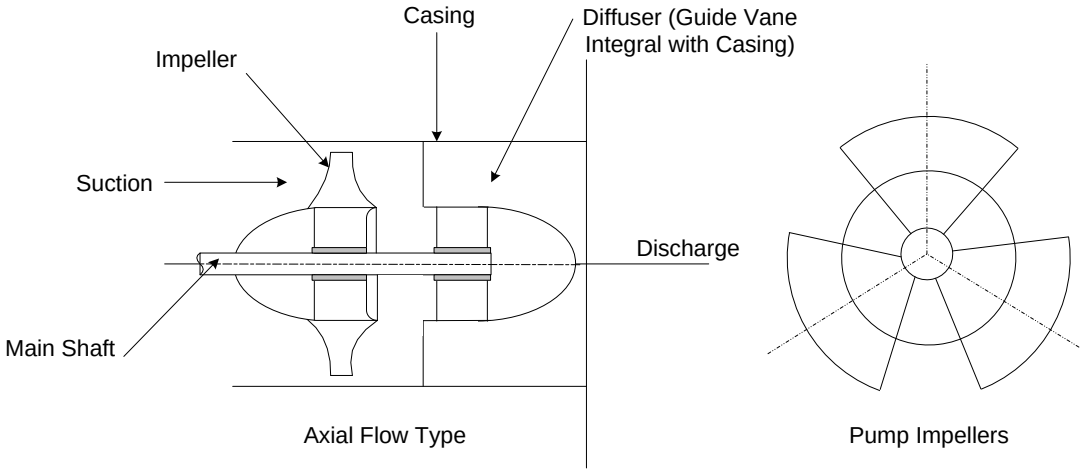


ภาพที่ 7.11 กราฟสมรรถนะการทำงานของปั๊มเทอร์ไบน์

4. ปั๊มแบบไหลตามแนวแกน (Axial Flow Pump)

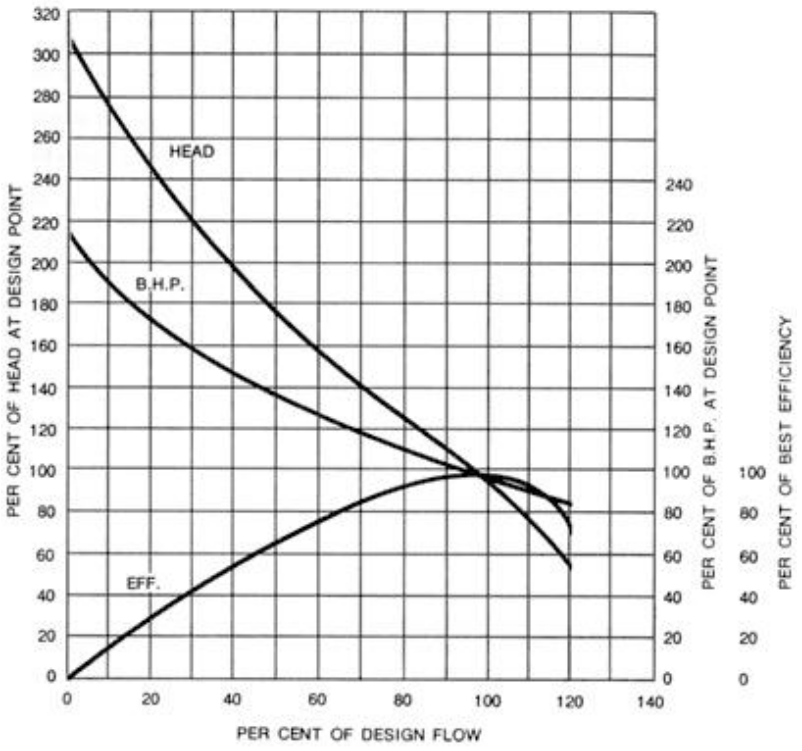
ปั๊มแบบไหลตามแนวแกนมีใบพัดทำมุมกับแนวแกน เมื่อแกนหมุนใบพัดจะผลักดันให้น้ำมีความดันและมีการไหลตัวด้วยความเร็ว โดยน้ำไหลเข้าหาปั๊ม (ท่อ) ตามแนวแกนของปั๊มและไหลออกจากปั๊มในทิศทางเดียวกัน หลังใบพัดจะมี Diffuser หรือ Guide Vane เป็นตัวเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำและเปลี่ยนความเร็วส่วนหนึ่งเป็นความดันน้ำที่ถูกใบพัดผลักดันนอกจากจะไหลไปข้างหน้าแล้วจะวนรอบแกนด้วยแต่ Guide Vane จะเปลี่ยนทิศทางการไหลให้ตรงตามแนวแกน

ใบพัดของปั๊มจะมี 3 แฉก บิดเป็นมุมกับแนวแกนโดยใบพัดอาจปรับมุมกับแกนได้หรือมีมุมตายตัวปั๊มแบบนี้จะมี Specific Speed (N_1) ระหว่าง 1,300 ถึง 2,500 แต่ส่วนใหญ่จะประมาณ 1,500 สมรรถนะของปั๊มจะเป็นไปตามกราฟตัวอย่างข้างล่าง โดยถ้าเพิ่มอัตราการไหลแรงดันของน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็วและต่างจากปั๊มแบบหอยโข่ง คือ ยิ่งอัตราการไหลต่ำ ยิ่งต้องการแรงม้ามาก และถ้าอัตราการไหลสูงมากอาจจะมีการสั่นสะเทือนมาก ฉะนั้นปั๊มแบบนี้จึงควรมีอัตราการไหลระหว่าง 70–140% ของจุดที่ออกแบบได้หรือจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



ภาพที่ 7.12 ปั๊มแบบไหลตามแนวแกน

กราฟสมรรถนะการทำงานของปั๊มแบบไหลตามแนวแกนแสดงตามภาพข้างล่าง



ภาพที่ 7.13 กราฟสมรรถนะการทำงานของปั๊มแบบไหลตามแนวแกน

วิธีการทดลอง

ชุดทดลองนี้สามารถทดสอบปั๊มได้ 5 ชนิด โดยทดสอบทีละตัว คือ ปั๊มแบบหอยโข่ง ปั๊มเกียร์ ปั๊มแบบสูบชัก ปั๊มแบบไหลตามแนวแกน และแบบกำหนดอัตราการไหล

ก่อนการทดลองดำเนินการดังนี้

1) เติมน้ำให้เต็มถังเก็บด้านล่าง (ห่างขอบ 5-10 ซม.) น้ำนี้ควรผสมน้ำยากันสนิมจะเป็นชนิดที่ใช้กับรถยนต์ก็ได้

2) กรอกน้ำให้เต็มปั๊มหอยโข่งแล้วปิดผาเติม (ล่อน้ำ)

3) เปิดวาล์วของปั๊มทางออกหอยโข่งและวาล์วควบคุมการไหลท่อส่ง (หลังมาตรวัดน้ำ) และเปิดวาล์วทางออกของปั๊มอื่นทุกตัว

4) ดูเกจวัดความดันทั้งทางเข้าและออกทุกตัวอ่านที่"0" หากเข็มไม่ชี้ที่ “0” ให้ถอดปลายท่อน้ำความดัน (ท่อพลาสติกขุ่นขาว) ด้านใดด้านหนึ่งออก เพื่อระบายความดันแล้วเสียบคืนดังเดิม เข็มความดันขณะนี้ควรอ่านที่ “0”

5) เปิดปุ่ม ON ที่ตู้ควบคุมเปิดสวิทซ์ของเครื่องปรับความถี่ ขณะนี้อุปกรณ์วัดแบบตัวเลขต่าง ๆ ที่หน้าตู้ควรอ่าน “0” หากไม่ “0” ควรดูรายละเอียดตามเอกสารแนบของแต่ละอุปกรณ์

❑ <u>การทดลองปั๊มหอยโข่ง</u>

1) เปิดวาล์วทางออกของปั๊มหอยโข่ง และวาล์วควบคุมการไหล และเปิดวาล์วทางออกของปั๊มอื่นทุกตัว

2) เปิดปั๊มและปรับรอบไปที่ความเร็วรอบสูงสุด (2,900 รอบ/นาที) เละหรี่วาล์วทางออกของปั๊มเพื่อเพิ่มความดันเป็น 0.6 กก./ซม.^{2} และบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

ความเร็วรอบของปั๊ม	รอบ/นาที
ความดันที่ท่อดูด	กก./ซม.^{2}
ความดันที่ท่อส่ง	กก./ซม.^{2}
ปริมาตรการไหล	ลิตร/นาที
แรงหมุน	นิวตัน-เมตร

3) หรี่วาล์วทางออกของปั๊มให้ความดันลดลงเป็น 1.5, 1.0 และ 0.5 กก./ซม.^{2} และความดันเมื่อวาล์วปิดสุด แล้วบันทึกข้อมูลตามข้อ 2)

ในกรณีที่ลดความดันแล้วรอบของปั๊มตกให้เพิ่มความถี่ของเครื่องปรับรอบเพื่อปรับรอบขึ้น การที่รอบตกเมื่อความดันลดลงนี้เป็นธรรมชาติของมอเตอร์ เพราะที่ความดันต่ำจะต้องใช้พลังงานขับมากขึ้น

4) ปรับรอบของมอเตอร์ให้เหลือ 2,500, 2,000 และ 1,500 รอบ/นาที ตามลำดับ และบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกับข้อ 2)

❑ <u>การทดลองปั๊มสูบชัก</u>

1) เปิดวาล์วทางออกของปั๊มสูบชัก และวาล์วควบคุมการไหล และเปิดวาล์วทางออกของปั๊มอื่นทุกตัว

2) ปรับความเร็วของรอบปั๊มเป็นประมาณ 300 รอบ/นาที และหรี่วาล์วทางออกของปั๊มเป็นประมาณ 0.5 กก./ซม.^{2} แล้วบันทึกข้อมูลดังนี้

ความเร็วรอบของปั๊ม	รอบ/นาที
ความดันที่ท่อดูด	กก./ซม.^{2}
ความดันที่ท่อส่ง	กก./ซม.^{2}
ปริมาตรการไหล	ลิตร/นาที
แรงหมุน	นิวตัน-เมตร

3) หรี่วาล์วปรับอัตราการไหลให้ความดันเพิ่มขึ้นครั้งละประมาณ 0.5 กก./ซม.^{2} และบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกับข้อ 2) จนกระทั่งความดันสูงสุด ความดันสูงสุดจะถูกควบคุมด้วยวาล์วควบคุมความดัน ซึ่งชุดทดลองนี้ตั้งไว้ที่ 3 กก./ซม.^{2} เพื่อความปลอดภัย

4) ปรับความเร็วรอบเข้าที่ 250, 200 และ 150 รอบ/นาที ตามลำดับ และบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกับข้อ 2)

- <u>การทดลองปั๊มเทอร์ไบน์</u>

1) ปรับวาล์วทางออกของปั๊มเทอร์ไบน์ และวาล์วควบคุมอัตราการไหลและปิดวาล์วทางออกอื่นทุกตัว

2) ปรับความเร็วของรอบปั๊มเป็นประมาณ 2,900 รอบ/นาที และหรี่วาล์วทางออกของปั๊มเป็นประมาณ 0.4 กก./ซม.^{2} แล้วบันทึกข้อมูลดังนี้

ความเร็วรอบของปั๊ม	รอบ/นาที
ความดันที่ท่อดูด	กก./ซม.^{2}
ความดันที่ท่อส่ง	กก./ซม.^{2}
ปริมาตรการไหล	ลิตร/นาที
แรงหมุน	นิวตัน-เมตร

จับเวลาและบันทึกปริมาตรของน้ำผ่านมาตรวัดน้ำเพื่อความแม่นยำ การจับเวลาควรเริ่มเมื่อเข็มมาตรวัดน้ำอยู่ที่ตำแหน่ง “0” และหยุดเมื่อเข็มมาตรวัดน้ำอยู่ที่ตำแหน่ง “0” เช่นกัน จะกี่รอบก็แล้วแต่เวลาควรประมาณอย่างน้อย 1 นาที

การจับเวลาของถังวัดปริมาตรก็ทำในลักษณะเดียวกัน คือ เริ่มจับเวลาที่เลขลงตัว (ควรเป็นระดับ ”0”) และหยุดที่ระดับของเลขลงตัว

3) หรี่วาล์วปรับอัตราการไหลให้ความดันเพิ่มขึ้นครั้งละประมาณ 0.4 กก./ซม.^{2} และบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกับข้อ 2) จนกระทั่งความดันสูงสุด

4) ปรับความเร็วรอบเข้าที่ 2,500, 2,000 และ 1,500 รอบ/นาที ตามลำดับ และบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกับข้อ 2)

❑ <u>การทดลองปั๊มไหลตามแนวแกน</u>

1) เปิดสวิทซ์ไฟไปที่ ON เพื่อเปิดไฟเข้าระบบการควบคุมเปิดปุ่มชุดควบคุทความเร็วไปที่ ON ปรับปุ่มความเร็วให้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก “0” ไปที่ประมาณ 2,900 รอบ/นาที

2) บันทึกข้อมูลดังนี้

ความเร็วรอบของปั๊ม
ระดับปรอทของมาโนมิเตอร์ทั้งท่อดูดและท่อส่ง
อัตราการไหลของน้ำจากอุปกรณ์วัดแบบตัวเลข
แรงหมุน (นิวตัน-เมตร)

3) หรี่วาล์วทางออกของปั๊มน้ำให้ระดับมาโนมิเตอร์ของความดันท่อน้ำส่งต่างกันประมาณ 5 ซม. แล้วบันทึกข้อมูลตามข้อ 2)

4) หรี่วาล์วจนระดับมาโนมิเตอร์ท่อส่งต่างกันเพิ่มขึ้น ครั้งละประมาณ 4 ซม. แล้วบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกับ 2) จนกระทั่งระดับต่างเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 30 ซม.

5) ลดความเร็วรอบเป็นประมาณ 2,500, 2,000 และ 1,500 รอบ/นาที ตามลำดับ และบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2)

❑ <u>การทดลองปั๊มหอยโข่งชนิดหลายใบพัด</u>

1) เปิดวาล์วทางออกของปั๊มหอยโข่ง และวาล์วควบคุมการไหล และเปิดวาล์วทางออกของปั๊มอื่นทุกตัว

2) เปิดปั๊มและปรับรอบไปที่ความเร็วรอบสูงสุด (2,900 รอบ/นาที) และหรี่วาล์วทางออกของปั๊มเพื่อเพิ่มความดันเป็น 0.6 กก./ซม.^{2} และบันทึกข้อมูลดังต่อไปนี้

ความเร็วรอบของปั๊ม	รอบ/นาที
ความดันที่ท่อดูด	กก./ซม.^{2}
ความดันที่ท่อส่ง	กก./ซม.^{2}
ปริมาตรการไหล	ลิตร/นาที
แรงหมุน	นิวตัน-เมตร

3) หรี่วาล์วทางออกของปั๊มน้ำให้ความดันลดลงเป็น 1.5, 1.0 และ 0.5 กก./ซม.^{2} และความดันเมื่อวาล์วปิดสุด แล้วบันทึกข้อมูลตามข้อ 2)

ในกรณีที่ลดความดันแล้วรอบของปั๊มตกให้เพิ่มความถี่ของเครื่องปรับรอบเพื่อปรับรอบขึ้น การที่รอบตกเมื่อความดันลดลงนี้เป็นธรรมชาติของมอเตอร์ เพราะที่ความดันต่ำจะต้องใช้พลังงานขับมากขึ้น

4) ปรับรอบของมอเตอร์ให้เหลือ 2,500, 2,000 และ 1,500 รอบ/นาที ตามลำดับ และบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกับข้อ 2)

❑ <u>เมื่อเลิกทดลอง</u>

1) ลดความถี่มาที่ “0” และปิดสวิทซ์เครื่องปรับความถี่

2) กดปุ่มตัดไฟเข้าตู้ควบคุม (ปุ่ม OFF)

3) ปล่อยน้ำออกจากปั๊มให้หมดโดยการคลายสกรูที่ด้านล่างและปิดสกรูคืนตามเดิม

❑ <u>การระวังรักษา</u>

การระวังรักษาชุดทดสอบนี้ ถือหลักเช่นเดียวกับการระวังเครื่องประเภทเดียวกันอื่น ๆ ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะเรื่องทั่วไปดังนี้

1. ทั่วไป

1) ชุดทดสอบนี้ใช้ล้อรองรับเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายในกรณีที่มีการเคลื่อนย้าย ควรปล่อยน้ำในถังเก็บออกให้หมดก่อนเพื่อลดน้ำหนักบนล้อ

2. ปั๊มน้ำ

1) อย่าเดินปั๊มโดยไม่มีน้ำจะทำให้ประเก็นกันรั่วของปั๊มชำรุด

2) ในกรณีที่ไม่มีการใช้เป็นเวลานาน ให้ปล่อยน้ำออกจากปั๊มให้หมด

3) ในกรณีที่ต้องถอดปั๊มออกจากมอเตอร์ไม่ว่ากรณีใด ๆ การต่อปั๊มเข้ากับมอเตอร์ใหม่ต้องเช็คให้แน่ใจว่าเพลาของปั๊มและเพลาของมอเตอร์ได้แนวกัน มิฉะนั้นจะเกิดการสั่น ซึ่งจะทำให้แบริ่งและประเก็นกันรั่วเสียได้

3. มอเตอร์

1) โดยปกติแบริ่งของมอเตอร์จะเป็นชนิดที่มีหล่อลื่นในตัว อย่าอัดจารบีเข้าไปเกินกว่าครึ่งหนึ่งของช่องว่างแบริ่ง

2) ในกรณีของมอเตอร์มีเกียร์ ควรตรวจเช็คระดับน้ำมันในห้องเกียร์เป็นประจำ

3) ในกรณีมอเตอร์กระแสตรง การปรับความเร็วรอบต้องปฏิบัติตามวิธีการใช้ในคู่มือโดยเคร่งครัด และต้องค่อย ๆ ปรับ

4. น้ำ

น้ำที่ใช้ในการทดลองควรเป็นน้ำสะอาด ปราศจากสิ่งสกปรกและจะให้ดีควรผสมน้ำยากันสนิมหรือน้ำมันสบู่หรือน้ำมันที่ละลายในน้ำได้ (Emulsified Oil) ซึ่งเมื่อผสมน้ำมันแล้วจะมีสีขุ่นขาวเพื่อป้องกันการเกิดสนิมในระบบ

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 7.1 ปั๊มน้ำแบบหอยโข่ง (Centrifugal Pump)

กลุ่มที่_____ วันที่ทดลอง_____

ผู้ทำการทดลอง _____ แผ่นที่_____

ความเร็วรอบของปั๊มน้ำ (รอบ/นาที)	ความดัน (กก./ตร.ซม.)			แรงหมุน (นิวตัน-เมตร)	มาตรวัดน้ำ		อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	กำลังที่ให้แก่ปั๊ม W (วัตต์)	กำลังที่ได้จากปั๊ม W (วัตต์)	ประสิทธิภาพของปั๊ม (%)	หมายเหตุ
	ท่อจ่าย	ท่อดูด	ผลต่าง		ปริมาตร (ลิตร)	เวลา (วินาที)					

หมายเหตุ : W_1 = 0.10476 Tn, W_0 = 1.635 PQ และประสิทธิภาพของปั๊ม = (W_o/W_1)x100%

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 7.2 ปั๊มน้ำแบบสูบชัก (Reciprocating Pump)

กลุ่มที่_____ วันที่ทดลอง_____

ผู้ทำการทดลอง _____ แผ่นที่_____

ความเร็วรอบของปั๊มน้ำ (รอบ/นาที)	ความดัน (กก./ตร.ซม.)			แรงหมุน (นิวตัน-เมตร)	มาตรวัดน้ำ		อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	กำลังที่ให้แก่ปั๊ม W (วัตต์)	กำลังที่ได้จากปั๊ม W (วัตต์)	ประสิทธิภาพของปั๊ม (%)	หมายเหตุ
	ท่อจ่าย	ท่อดูด	ผลต่าง		ปริมาตร (ลิตร)	เวลา (วินาที)					

หมายเหตุ : W_1 = 0.10476 Tn, W_0 = 1.635 PQ และประสิทธิภาพของปั๊ม = (W_o/W_1)x100%

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 7.3 ปั๊มน้ำแบบเทอร์ไบน์ (Turbine Pump)

กลุ่มที่_____ วันที่ทดลอง_____

ผู้ทำการทดลอง _____ แผ่นที่_____

ความเร็วรอบของปั๊มน้ำ (รอบ/นาที)	ความดัน (กก./ตร.ซม.)			แรงหมุน (นิวตัน-เมตร)	มาตรวัดน้ำ		อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	กำลังที่ให้แก่ปั๊ม W (วัตต์)	กำลังที่ได้จากปั๊ม W (วัตต์)	ประสิทธิภาพของปั๊ม (%)	หมายเหตุ
	ท่อจ่าย	ท่อดูด	ผลต่าง		ปริมาตร (ลิตร)	เวลา (วินาที)					

หมายเหตุ : W_1 = 0.10476 Tn, W_0 = 1.635 PQ และประสิทธิภาพของปั๊ม = (W_o/W_1)x100%

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 7.4 ปั๊มน้ำแบบไหลตามแนวแกน (Axial Flow Pump)

กลุ่มที่_____ วันที่ทดลอง_____

ผู้ทำการทดลอง _____ แผ่นที่_____

ความเร็วรอบของปั๊มน้ำ (รอบ/นาที)	ความดัน (cm of Hg)			ผลต่างความดัน (กก./ตร.ซม.)	แรงหมุน (นิวตัน-เมตร)	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	กำลังที่ให้แก่ปั๊ม W (วัตต์)	กำลังที่ได้จากปั๊ม W (วัตต์)	ประสิทธิภาพของปั๊ม (%)	หมายเหตุ
	ท่อจ่าย	ท่อดูด	ผลต่าง							

หมายเหตุ : W_1 = 0.10476 Tn, W_0 = 1.635 PQ และประสิทธิภาพของปั๊ม = (W_o/W_1)x100%

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 7.5 ปั๊มหอยโข่งชนิดหลายใบพัด (Multistage Centrifugal Pump)

กลุ่มที่_____ วันที่ทดลอง_____

ผู้ทำการทดลอง _____ แผ่นที่_____

ความเร็วรอบของปั๊มน้ำ (รอบ/นาที)	ความดัน (กก./ตร.ซม.)			แรงหมุน (นิวตัน-เมตร)	มาตรวัดน้ำ		อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	กำลังที่ให้แก่ปั๊ม W (วัตต์)	กำลังที่ได้จากปั๊ม W (วัตต์)	ประสิทธิภาพของปั๊ม (%)	หมายเหตุ
	ท่อจ่าย	ท่อดูด	ผลต่าง		ปริมาตร (ลิตร)	เวลา (วินาที)					

หมายเหตุ : W_1 = 0.10476 Tn, W_0 = 1.635 PQ และประสิทธิภาพของปั๊ม = (W_o/W_1)x100%

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณผลการทดลองดังนี้

-อัตราการไหลสำหรับปั๊มแบบต่าง ๆ
-ความดันต่างระหว่างท่อดูดและท่อจ่ายของปั๊ม
-แรงหมุนของมอเตอร์ได้จากหน้าปัทม์วัดแรงหมุนแบบตัวเลข
-กำลังม้าที่ให้แก่ปั๊ม กำลังม้าของน้ำจากปั๊ม และประสิทธิภาพของปั๊ม โดยคำนวณตามทฤษฎี

2) การนำผลการทดลองและการคำนวณมาเขียนกราฟ

-กราฟอัตราการไหลเทียบกับความดัน ณ ความเร็วรอบคงที่ (เลือกความเร็วรอบสูงสุดของแต่ละปั๊ม) โดยทำการเปรียบเทียบผลของทุกปั๊มในกระดาษกราฟแผ่นเดียวกัน โดยให้อัตราการไหลอยู่แกนนอน และความดันอยู่ในแนวแกนตั้ง
-กราฟอัตราการไหลเทียบกับความดัน ณ ความเร็วรอบอื่นๆ โดยทำการเปรียบเทียบของทุกความเร็วรอบในกระดาษกราฟแผ่นเดียวกันของแต่ละปั๊ม (5 ปั๊ม = 5 แผ่น) โดยให้อัตราการไหลอยู่แกนนอน และความดันอยู่ในแนวแกนตั้ง
-กราฟแรงม้าที่ให้แก่ปั๊ม, แรงม้าของน้ำที่ออกจากปั๊ม, เทียบกับความดัน ณ.ความเร็วรอบอันใดอันหนึ่ง
-กราฟประสิทธิภาพของปั๊มเทียบกับอัตราการไหล

เอกสารอ้างอิง

โครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2549. **คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ EGCE 322 Hydraulic Engineering Laboratory**.

ไตรรัตน์ ศรีวัฒนา, ชูเกียรติ ทรัพย์ไพศาล และพงษ์ศักดิ์ เสริมสาธนสวัสดิ์. 2524. **ปฏิบัติการทางชลศาสตร์**. เอกสารวิชาการ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิมิตร เฉิดฉันท์พิพัฒน์. **ปฏิบัติการกลศาสตร์ของของไหล**. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บริษัท เอสซอม จำกัด. 1999. **คู่มือการใช้และการทดลอง ชุดปั๊มชุด HP 405 Multi Pump Test Set**.

บริษัท เอสซอม จำกัด. 1999. **คู่มือการใช้และการทดลอง ชุดทดสอบปั๊มแบบต่อขนานและอนุกรม HP 302 Series and Parallel Pumps Test Set**.

วิบูลย์ บุญยธโรกุล 2529 **ปั๊มและระบบสูบน้ำ** ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Essom Company Limited. 1999. **Technical Training Equipment**.

บทปฏิบัติการที่ 8

การไหลซึมผ่านตัวกลางและโครงข่ายการไหล

(Permeability and Flow Nets)

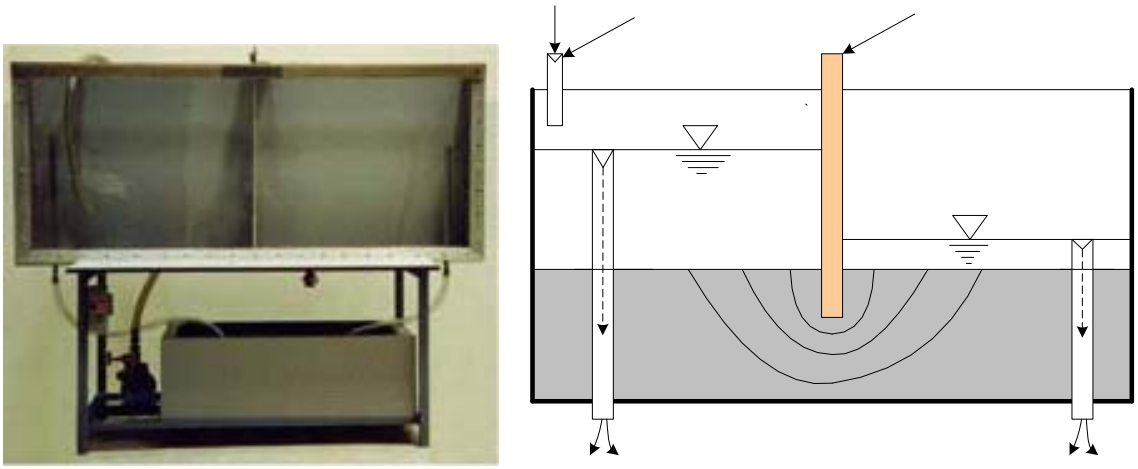
วัตถุประสงค์

ในการก่อสร้างที่ใช้วัสดุก่อสร้างที่เป็นดิน เช่น การก่อสร้างถนน การก่อสร้างเขื่อนดิน หรือการก่อสร้างอื่นที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน เมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วหรือขณะที่ทำการก่อสร้างจะมีน้ำไหลเข้ามาในดิน จะมีปริมาณมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของดิน สัมประสิทธิ์การไหลซึมของดิน และความดันของน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทราบลักษณะการไหลของน้ำผ่านดินที่เรียกว่าตัวกลาง และสามารถคำนวณปริมาณการไหลซึมของน้ำ ว่ามีปริมาณมากน้อยเพียงใด สามารถที่จะทำการป้องกันการไหลซึมของน้ำอย่างไร เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายกับโครงสร้างในสภาพ Piping หรือ Quick Sand ซึ่งเป็นอันตรายเป็นอย่างยิ่ง การไหลซึมนี้สามารถคำนวณได้โดยวิธีของ Flow Nets

วัตถุประสงค์ของศึกษามีดังนี้

1. ทราบลักษณะการไหลของน้ำผ่านตัวกลาง
2. สามารถเขียนตาข่ายของการไหลและนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณการไหลผ่านตัวกลางตามทฤษฎีได้
3. เปรียบเทียบปริมาณการไหลที่ได้จากการคำนวณได้ตามทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการวัด

อุปกรณ์และเครื่องมือ



ภาพที่ 8.1 ชุดทดสอบการซึมผ่านตัวกลางและโครงข่ายการไหล

ทฤษฎี

ในการทดลองดังกล่าว มีสมมุติฐานดังนี้

1) การไหลของน้ำผ่านตัวกลางจะไหลแบบสม่ำเสมอ (Steady State Flow)

2) ค่าของความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient, Pressure Gradient) จะมีค่าคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

3) มวลของตัวกลาง มีปริมาตรคงที่ และมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Homogeneous) และมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic)

4) การคำนวณปริมาณการไหล จะคำนวณในแนวระนาบ (Two Dimemsion) และมีค่าคงที่

- <u>กฎของดาร์ซี (Darcy's Law)</u>

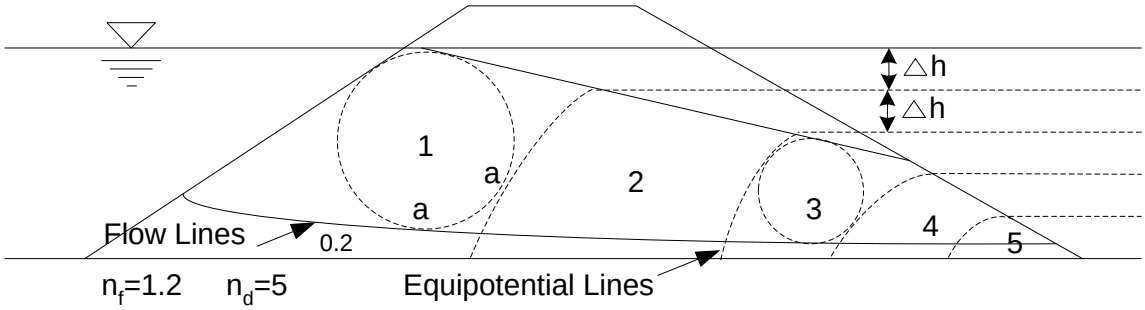
"ความเร็วในการไหลซึมของน้ำผ่านดินขึ้นอยู่กับช่องว่างระหว่างเม็ดดินกับค่าของความชันทางชลศาสตร์" สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$v = ki \qquad \text{----------(8.1)}$$

เมื่อ

v = ความเร็วของการไหลซึม
k = สัมประสิทธ์ของความซึมได้ (Coefficient of Permeability)
i = ความชันทางชลศสาตร์ (Hydraulic Gradient) $= \frac{\Delta h}{\Delta L}$
Δh = การสูญเสียแรงดัน
ΔL = ความยาวของส่วนการไหลผ่าน

- <u>ตาข่ายการไหลผ่านตัวกลาง (Flow Nets)</u>



ตาข่ายการไหล คือ ภาพแสดงทางเดินของน้ำผ่านตัวกลางโดยเขียนตามมาตราส่วนย่อ ประกอบด้วย เส้นสองเส้นประสานกันเป็นตาข่าย คือ Flow Lines และ Equipotential Lines

Flow Lines คือเส้นทางเดินของน้ำผ่านตัวกลาง ซึ่งมีจำนวนไม่จำกัด และจะไม่ตัดกัน เส้นขอบเขตที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ ถือว่าเป็น Flow Lines เส้นหนึ่ง และจะเลือกเขียนเส้น Flow Lines ขึ้นมาจำนวนหนึ่ง โดยแต่ละเส้นจะขนานกับเส้นที่ผ่านมาโดยประมาณ

Equipotential Lines คือ เส้นที่มีแรงดันระดับ (Pressure Head) บนเส้น Equipotential Lines เท่ากัน ซึ่งมีจำนวนไม่จำกัด แต่จะเขียนขึ้นมาจำนวนหนึ่ง เส้นขอบเขตที่น้ำไหลเข้าและไหลออกจากดินถือว่าเป็น Equipotential Lines เส้นหนึ่ง

<u>การสร้างตาข่ายการไหล</u>

1. คุณสมบัติของเส้น Flow Lines

ก) จะทำมุมตั้งฉากกับผิวทางเข้าและทางออก
ข) แต่ละเส้นจะไม่ตัดกัน
ค) แต่ละเส้นจะขนานกับเส้นที่ผ่านมาโดยประมาณ
ง) เส้นขอบเขตการไหลที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ถือว่าเป็น เส้น Flow Lines

2. คุณสมบัติของเส้น Equipotential Lines

ก) จะตัดเส้น Flow Lines เป็นมุมฉาก
ข) จะตั้งฉากกับผิวที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้
ค) เขียน Equipotential Lines เพื่อให้ได้ รูปตาข่ายเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยประมาณ
ง) เส้นขอบเขตที่น้ำไหลเข้าและไหลออก ถือเป็นเส้น Equipotential Lines

ตารางที่ 8.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในดิน

ชนิดของดิน	ค่าความซึมได้ของน้ำในดิน (มม./วินาที)	คุณสมบัติการระบายน้ำ
กรวด	มากกว่า 10	ดี
ทราย	$10 - 10^{-2}$	ดี
ทรายละเอียด ตะกอนทรายหยาบ	$10^{-2} - 10^{-4}$	ปานกลาง
ตะกอนทราย	10^{-4}-10^{-6}	เลว

n_f = จำนวนช่องการไหล (number of flow path) จะมีค่าเป็นจำนวนเต็มหรือทศนิยมก็ได้ตามภาพ n_f =1.2

n_d = จำนวนช่วงการลดพลังงานการไหล(number of drop) จะมีค่าเป็นจำนวนเต็มเสมอตามภาพ n_d = 5

พิจารณาจากสมการ

$$Q = Av \qquad \text{----------(8.2)}$$

เมื่อ

Q = อัตราของการไหลที่ไหลผ่านตัวกลางในหนึ่งหน่วยเวลาและความกว้าง

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวกลางการไหล

v = ความเร็วในการไหลของไหล

k = สัมประสิทธิ์ของความซึมได้ (Coefficient of Permeability)

i = ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient) $= \frac{\Delta h}{\Delta L}$

Δh = ความต่างของระดับน้ำในช่วงความยาวของการไหลซึม ΔL

ΔL = ช่วงความยาวของการไหลซึม (ที่ความต่างของระดับน้ำ Δh)

จากสมการที่ 8.2 จะได้ว่า $Q = Aki$

$$Q = Ak\frac{\Delta h}{\Delta L} \qquad \text{----------(8.3)}$$

คิดเต็มพื้นที่ทั้งหมดของตัวกลางจะได้ว่า

$$A = a.n_f$$

และ $\Delta h = h$

$$\Delta L = a.n_d$$

เมื่อ a = ความกว้างและความยาวของสี่เหลี่ยมจัตุรัสในแต่ละรูป

แทนค่าในสมการ 8.3 $Q = a.n_f .k[h/a.n_d]$

$$Q = k.h.(n_f / n_d) \quad \text{----------} \quad (8.4)$$

วิธีการทดลอง

1) วัดขนาดของเครื่องมือ กว้าง ยาว ลึก ขนาดของฉาก (Screen)

2) ทำการเกลี่ยดินตัวกลางให้มีความสูงสม่ำเสมอ ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของฉากกั้น (Screen) พร้อมทั้งวัดตำแหน่งของดินตัวกลางด้านหน้าจากฉากกั้น ทุก ๆ 10 ซม. เพื่อทำการเขียนเส้น Flow Lines ต่อไป

3) ปล่อยให้น้ำไหลเข้าในดินตัวกลางอย่างสม่ำเสมอ และสังเกตระดับน้ำด้านหน้าและด้านหลังของฉาก คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ทำการจดบันทึกระดับน้ำไว้

4) เริ่มทำการทดลองโดยนำเข็มที่ผสมสารละลายฟลูออเรสเซน สีส้มปนเขียว (Liquid of Orange-Greenish Colour) มาจุ่มลงในตัวกลางในตำแหน่งที่ทำการวัดในข้อ 2 จะสังเกตุเห็นสีเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของการไหล ต่อจากนั้นให้ลากเส้นตามการเดินทางของสี จะได้เส้นทิศทางของการไหล (Flow Lines)

5) ทำการทดลองในข้อที่ 4 ซ้ำอีก จนกระทั่งครบทุกตำแหน่งที่ได้ทำการวัดไว้ และทำการปิดน้ำทางเข้า

6) ทำการเขียนเส้น Equipotential Lines คุณสมบัติของเส้น

7) ปรับเส้น Flows Lines และ เส้น Equipotential Lines ให้มีคุณสมบัติตามทฤษฎี และพยายามเขียนให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส (เขียนด้านหน้าของฉากเพียงด้านเดียว)

8) นำกระดาษไขที่เตรียม มาทาบกับตัวกลางด้านหน้า แล้วลากเส้น Flows Lines และเส้น Equipotential Lines ตามที่เขียนได้ นับจำนวนของ n_f และ n_d แล้วเขียนลงในกระดาษไข เขียนชื่อกลุ่ม นักศึกษาที่ทำการทดลอง ส่งอาจารย์ที่ควบคุมการทดลอง นำค่าที่ได้ไปคำนวณปริมาณการไหลต่อไป

9) ทำความสะอาดเครื่องมือ และเก็บให้เรียบร้อย

หมายเหตุ ในการทดลองให้ใช้ค่า k = 1 มม./ วินาที

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) ทำการสังเกตลักษณะของเส้นการไหล

2) สร้างโครงข่ายการไหลจากผลการทดลอง

3) หาอัตราการไหลซึมผ่านตัวกลาง

เอกสารอ้างอิง

เอกสารประกอบการสอนวิชา EGCE 331 SOIL MCHANICS ของ ผศ. ปิยะ รัตนสุวรรณ

กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม ของ มณเทียร กังศศิเทียม

บทปฏิบัติการที่ 9

การวัดอัตราการไหลโดยพาร์แชลฟลูม

(Flow Measurement by Parshall Flume)

วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาถึงวิธีการวัดอัตราการไหลโดยพาร์แชลฟลูมทั้งในลักษณะการไหลแบบอิสระ (Free Flow) และการไหลแบบน้ำท่วมจม (Submerged Flow)

2) เพื่อตรวจสอบความละเอียดแม่นยำในการวัดอัตราการไหลด้วยพาร์แชลฟลูม

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) รางน้ำรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 6 เมตร

2) พาร์แชลฟลูม (Parshall Flume) ย่อส่วนจากขนาดมาตรฐาน 12 นิ้ว โดยใช้อัตราส่วน 1:4 ดังภาพที่ 9.1

a) รางน้ำ

b) พาร์แชลฟลูม

ภาพที่ 9.1 ชุดทดสอบการวัดอัตราการไหลโดยพาร์แชลฟลูม

3) นาฬิกาจับเวลา

4) ไม้บรรทัด และเทปวัดความยาว

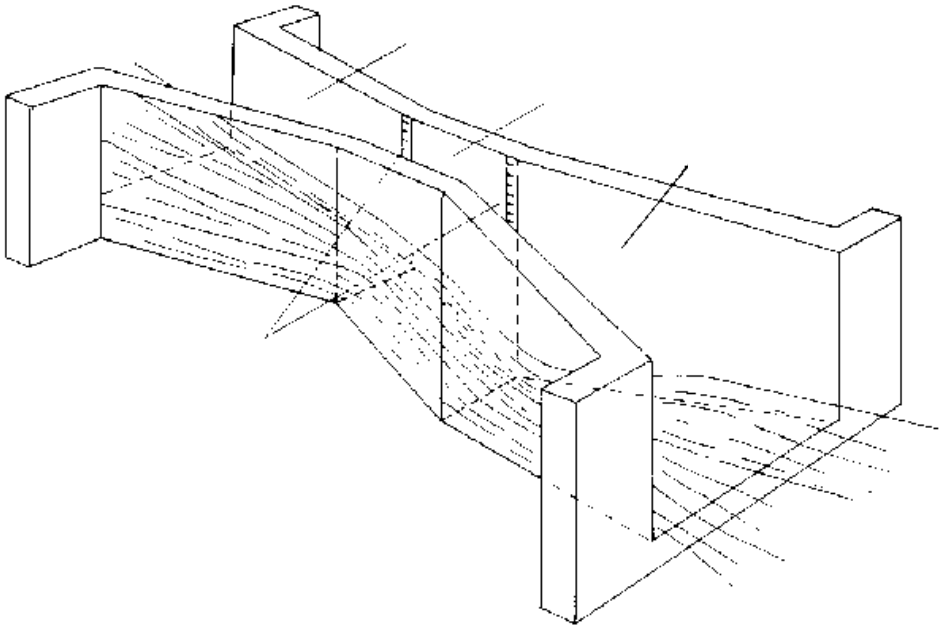
5) ถังวัดปริมาตรน้ำ

ทฤษฎี

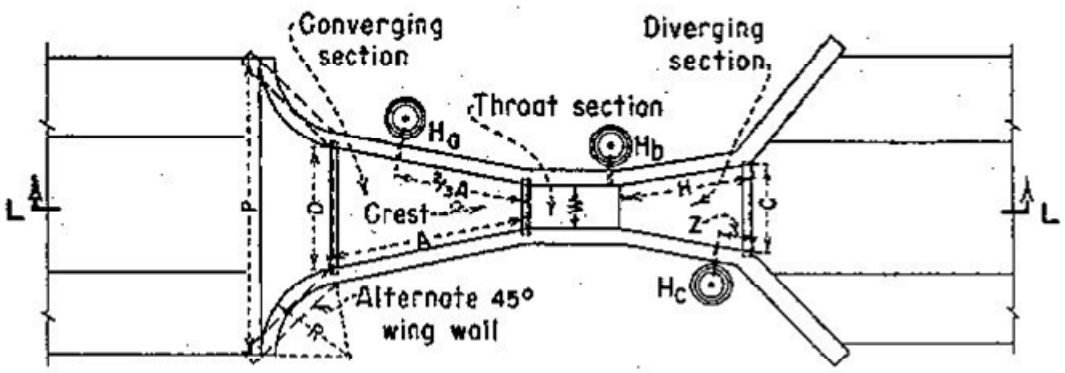
พาร์แชลฟลูมเป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลในรางเปิด (Open Channel) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ปากทางเข้าซึ่งจะมีลักษณะสอบแคบเข้ามา (Converging Section) คอคอด (Throat) ซึ่งเป็นส่วนที่แคบที่สุด และปลายทางออก ซึ่งมีลักษณะผายกว้างออก (Diverging Section) ตามภาพที่ 9.2

ระดับพื้นในส่วนที่เป็นปากทางเข้าจะถูกยกให้สูงกว่าระดับพื้นรางเล็กน้อยเรียกส่วนนี้ว่าสัน (Crest) เมื่อเข้าสู่คอคอดพื้นจะเทลาดลงอย่างรวดเร็ว และจะลาดขึ้นใหม่ในส่วนที่เป็นปากทางออก

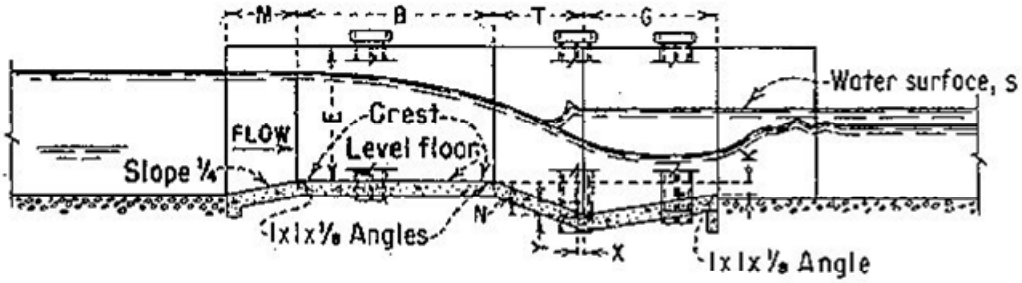
ที่บริเวณปากทางเข้า และบริเวณคอคอด มีท่อเจาะผ่านผนังของพาร์แชลฟลูมมาเข้าบ่อสำหรับวัดระดับน้ำติดตั้งอยู่ อัตราการไหลของน้ำผ่านพาร์แชลฟลูมจะมาได้โดยการวัดความสูงของระดับน้ำในบ่อทั้งสองนี้



a) ส่วนประกอบที่สำคัญของพาร์แชลฟลูม



Plan



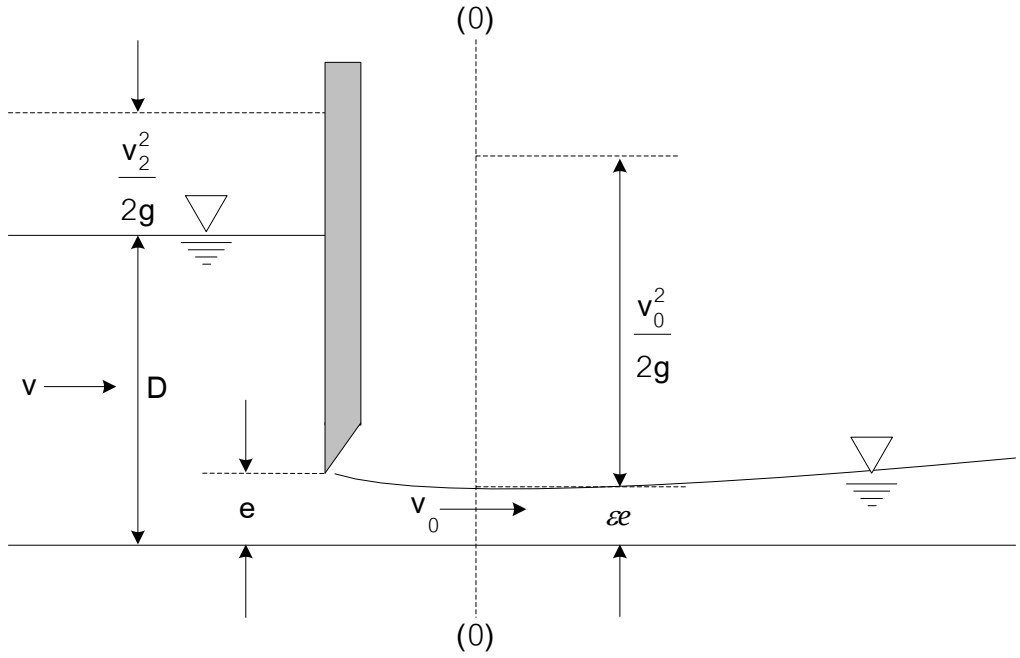
Section L-L

b) รูปแปลนและรูปหน้าตัดตามยาวของพาร์แชลฟลูม

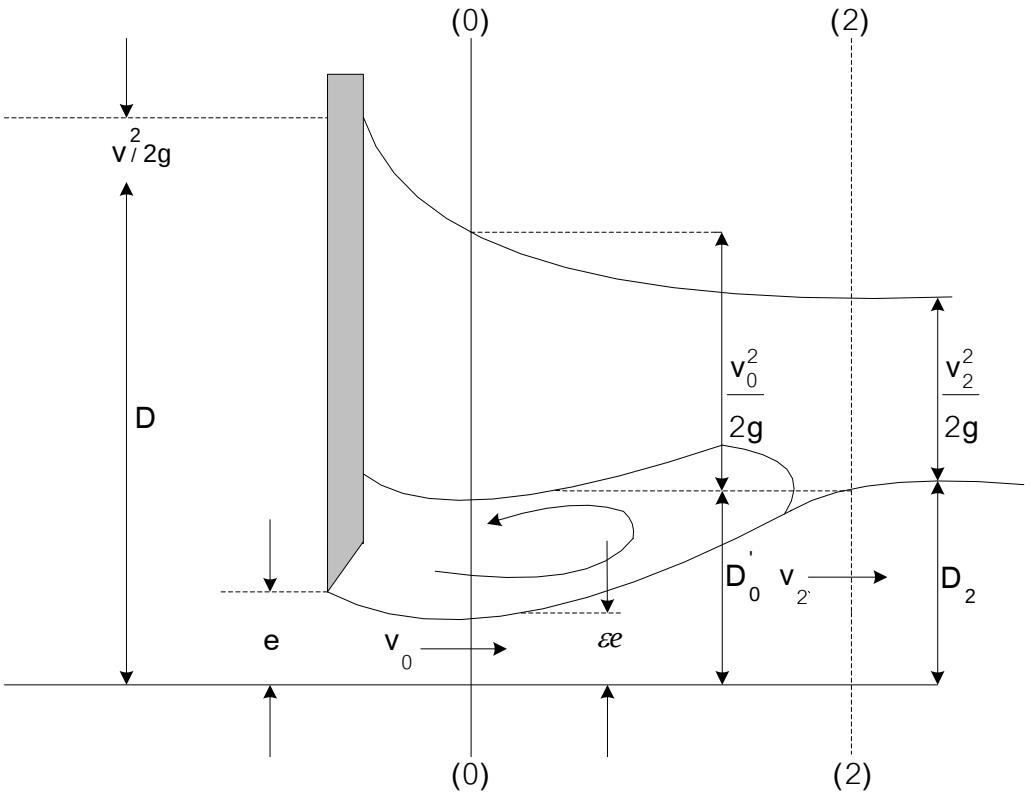
ภาพที่ 9.2 ลักษณะพาร์แชลฟลูม

- ลักษณะการไหลผ่านพาร์แชลฟลูม

น้ำที่ไหลผ่านพาร์แชลฟลูมอาจจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ การไหลแบบอิสระ (Free Flow Condition) และการไหลแบบท่วมจม (Submerged Flow Condition) ดังแสดงในภาพที่ 9.3a และ 9.3b ตามลำดับ



a) การไหลแบบอิสระ (Free Flow)



b) การไหลแบบท่วมจม (Submerged Flow)

ภาพที่ 9.3 การไหลแบบอิสระและการไหลแบบท่วมจม

1. การไหลแบบอิสระ (Free Flow Condition)

การไหลในลักษณะนี้จะสังเกตได้ว่าก่อนที่น้ำจะไหลเข้าสู่ส่วนที่เป็นคอคอด การไหลจะอยู่ในสภาพ Sub-Critical Flow คือ ไหลค่อนข้างช้า แต่เมื่อไหลผ่านคอคอด พื้นที่ลาดเอียงมากในบริเวณนั้นจะทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นจนกลายเป็นการไหลแบบ Super-Critical Flow ตรงปากทางออกก็จะเกิด Hydraulic Jump แล้วการไหลจะเปลี่ยนกลับเป็น Sub-Critical Flow อีกครั้งหนึ่ง

ลักษณะการไหลเช่นนี้ ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำของพาร์แชลฟลูมเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้จะไม่มีผลกระทบกระเทือนต่อระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำ เว้นเสียแต่ว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นจะมากจนทำให้ Hydraulic Jump เคลื่อนที่เข้ามาท่วมในบริเวณคอคอด จนทำให้ไม่มีการไหลส่วนที่เป็น Super Critical Flow เหลืออยู่

สำหรับการไหลแบบอิสระนี้ อัตราการไหลจะขึ้นอยู่กับความลึกของน้ำที่วัดบ่อ A (H_a) เท่านั้น ไม่จำเป็นต้องวัดระดับน้ำที่บ่อ B (H_b)

2. การไหลแบบท่วมจม (Submerged Flow Condition)

ถ้าระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำเอ่อสูงขึ้นจนดันให้ Hydraulic Jump เคลื่อนที่ย้อนกลับเข้ามาในส่วนที่เป็นคอคอด และท่วมทับบริเวณที่การไหลควรจะเป็นแบบ Super-Critical Flow จนหมดแล้ว ต่อไปถ้ามีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำอีก จะทำให้ระดับน้ำทางด้านปากทางเข้าพาร์แชลฟลูมเปลี่ยนแปลงไปด้วย ลักษณะการไหลแบบนี้เรียกว่า การไหลแบบท่วมจม ซึ่งในสภาพนี้จะไม่สามารถสังเกตเห็นส่วนที่เป็น Super-Critical Flow และ Hydraulic Jump ได้ การไหลจะเป็นแบบ Sub-Critical Flow ตลอดตัว Flume

ถ้าเปรียบเทียบอัตราการไหลทั้งสองแบบ ในกรณีที่ค่า H_a เท่ากันแล้ว อัตราการไหลในขณะที่การไหลเป็นแบบท่วมจมจะมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลในขณะที่การไหลเป็นแบบอิสระ และจะขึ้นอยู่กับระดับน้ำในบ่อวัดทั้งสองบ่อ

อัตราส่วน $\frac{H_b}{H_a}$ เรียกว่า Degree of Submergence โดยทั่วไปสำหรับพาร์แชลฟลูมที่ความกว้างของคอคอดแคบกว่า 1 ฟุต การไหลจะเปลี่ยนเป็นแบบท่วมจมเมื่อค่า $\frac{H_b}{H_a}$ เกิน 0.60 และสำหรับพาร์แชลฟลูมขนาดระหว่าง 1-8 ฟุต การไหลจะเปลี่ยนเป็นแบบท่วมจม เมื่อ

อัตราส่วนนี้เกิน 0.70 ค่าอัตราส่วน $\frac{H_b}{H_a}$ ณ จุดที่การไหลจะเปลี่ยนจากการไหลแบบอิสระเป็นการไหลแบบท่วมจมนี้เรียกว่า Transition Submergence

❑ <u>สูตรคำนวณหาอัตราการไหลผ่านพาร์แชลฟลูม</u>

1. การไหลแบบอิสระ (Free Flow Condition)

สูตรทั่วไปที่ใช้คำนวณหาอัตราการไหลในกรณีที่การไหลเป็นแบบอิสระคือ

$$Q = KH_a^n \qquad \text{----------(9.1)}$$

เมื่อ

K, n = ค่าคงที่เฉพาะสำหรับพาร์แชลฟลูมแต่ละขนาด

สำหรับพาร์แชลฟลูมที่มีขนาดถูกต้องตามมาตรฐานแสดงในตารางที่ 9.1 ค่า K และ n ดูได้จากตารางที่ 9.2

ตารางที่ 9.1 ขนาดสัดส่วนมาตรฐานและช่องความสามารถวัดปริมาณน้ำของพาร์แชลฟลูมขนาดต่าง ๆ

	W		A		2/3 A		B		C		D		E		T		G		H		K		M		N		P		R		X		Y		Z		FREE-FLOW CAPACITY	
																																					MINIMUM	MAXIMUM
	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	FT.	IN.	SEC.-FT.	SEC.-FT.
[2]	0	1[1]	1	2 3/32	0	9 17/32	1	2	0	3 21/32	0	6 19/32	0	6 to 9	0	3	0	8	0	8 1/8	0	3/4	-	-	0	1 1/8		-	-		0	3/16	0	1/2	0	1/8	0.01.	0.19
		2[1]	1	4 5/16		10 7/8	1	4		5 5/16		8 13/32		6 to 10		4 1/2		10		10 1/8		7/8		-		1 11/16		-	-			3/8		1		1/4	.02	.47
		3[1]	1	6 3/8		1 1/4	1	6		7		10 7/16		10 to 12		6	1	0	1	10 5/32		1	-			2 1/4		--	--			1		1 1/2		1/2	.03	1.13
[3]	0	6	2	7/16	1	4 5/16	2	0	1	3 1/2	1	3 3/8	2	0	1	0	2	0	-		0	3	1	0	0	4 1/2	2	11 1/2	1	4	0	2	0	3	-		.05	3.9
		9	2	10 5/8	1	11 1/8	2	10	1	3	1	10 5/8	2	6	1	0	1	6	-			3	1	0		4 1/2	3	6 1/2	1	4		2		3	-		.09	8.9
	1	0	4	6	3	0	4	4 7/8	2	0	2	9 1/4	3	0	2	0	3	0	-			3	1	3		9	4	10 3/4	1	8		2		3	-		.11	16.1
	1	6	4	9	3	2	4	7 7/8	2	6	3	4 3/8	3	0	2	0	3	0	-			3	1	3		9	5	6	1	8		2		3	-		.15	24.6
	2	0	5	0	3	4	4	10 7/8	3	0	3	11 1/2	3	0	2	0	3	0	-			3	1	3		9	6	1	1	8		2		3	-		.42	33.1
	3	0	5	6	3	8	5	4 3/4	4	0	5	1 7/8	3	0	2	0	3	0	-			3	1	3		9	7	3 1/2	1	8		2		3	-		.61	50.4
	4	0	6	0	4	0	5	10 5/8	5	0	6	4 1/4	3	0	2	0	3	0	-			3	1	6		9	8	10 3/4	2	0		2		3	-		1.3	67.9
	5	0	6	6	4	4	6	4 1/2	6	0	7	6 3/8	3	0	2	0	3	0	-			3	1	6		9	10	1 1/4	2	0		2		3	-		1.6	85.6
	6	0	7	0	4	8	6	10 3/8	7	0	8	9	3	0	2	0	3	0	-			3	1	6		9	11	3 1/2	2	0		2		3	-		2.6	103.5
	7	0	7	6	5	0	7	4 1/4	8	0	9	11 3/8	3	0	2	0	3	0	-			3	1	6		9	12	6	2	0		2		3	-		3.0	121.4
	8	0	8	0	5	4	7	10 1/8	9	0	11	1 3/4	3	0	2	0	3	0	-			3	1	6		9	13	8 1/4	2	0		2		3	-		3.5	139.5
[4]	10	0	-		6	0	14	0	12	0	15	7 1/4	4	0	3	0	6	0	-		0	6	-		1	1 1/2	-		-		0	9	1	0	-		6	200
	12	0	-		6	8	16	0	14	8	18	4 3/4	5	0	3	0	8	0	-			6	-		1	1 1/2	-		-			9	1	0	-		8	350
	15	0	-		7	8	25	0	18	4	25	0	6	0	4	0	10	0	-			9	-		1	6	-		-			9	1	0	-		8	600
	20	0	-		9	4	25	0	24	0	30	0	7	0	6	0	12	0	-		1	0	-		2	3	-		-			9	1	0	-		10	1000
	25	0	-		11	0	25	0	29	4	35	0	7	0	6	0	13	0	-		1	0	-		2	3	-		-			9	1	0	-		15	1200
	30	0	-		12	8	26	0	34	8	40	4 3/4	7	0	6	0	14	0	-		1	0	-		2	3	-		-			9	1	0	-		15	1500
	40	0	-		16	0	27	0	45	4	50	9 1/2	7	0	6	0	16	0	-		1	0	-		2	3	-		-			9	1	0	-		20	2000
	50	0	-		19	4	27	0	56	8	60	9 1/2	7	0	6	0	20	0	-		1	0	-		2	3	-		-			9	1	0	-		25	3000

[1] Tolerance on throat width (w) ± 1/64 inch; tolerance on other dimensions ± 1/32 inch. Sidewalls of throat must be parallel and vertical.

[2] From Colorado State University Technical Bulletin No. 61.

[3] From U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Circular No. 843.

[4] From Colorado State University Bulletin No. 426-A

ตารางที่ 9.2 สูตรคำนวณหาอัตราการไหลแบบอิสระ

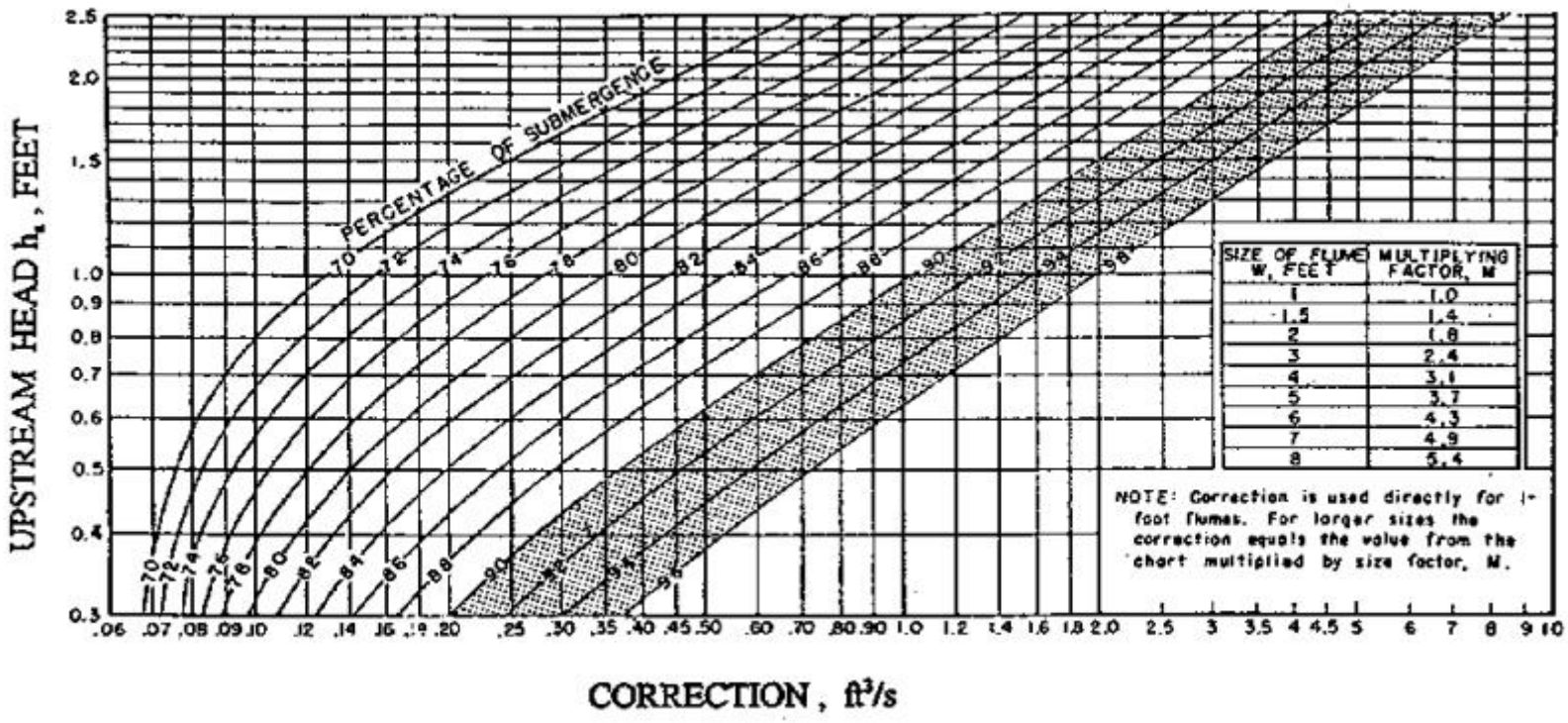
Throat Width	Equation
3”	$Q = 0.992H_a^{1.547}$
6”	$Q = 2.06H_a^{1.58}$
9”	$Q = 3.07H_a^{1.53}$
8”-12”	$Q = 4WH_a^{1.58}W^{0.026}$
10”-50”	$Q = (3.6785W + 2.5)H_a^{1.6}$

หมายเหตุ : Q = Discharge (cfs), Ha = Gauge Reading (ft), W = Throat Width (ft)

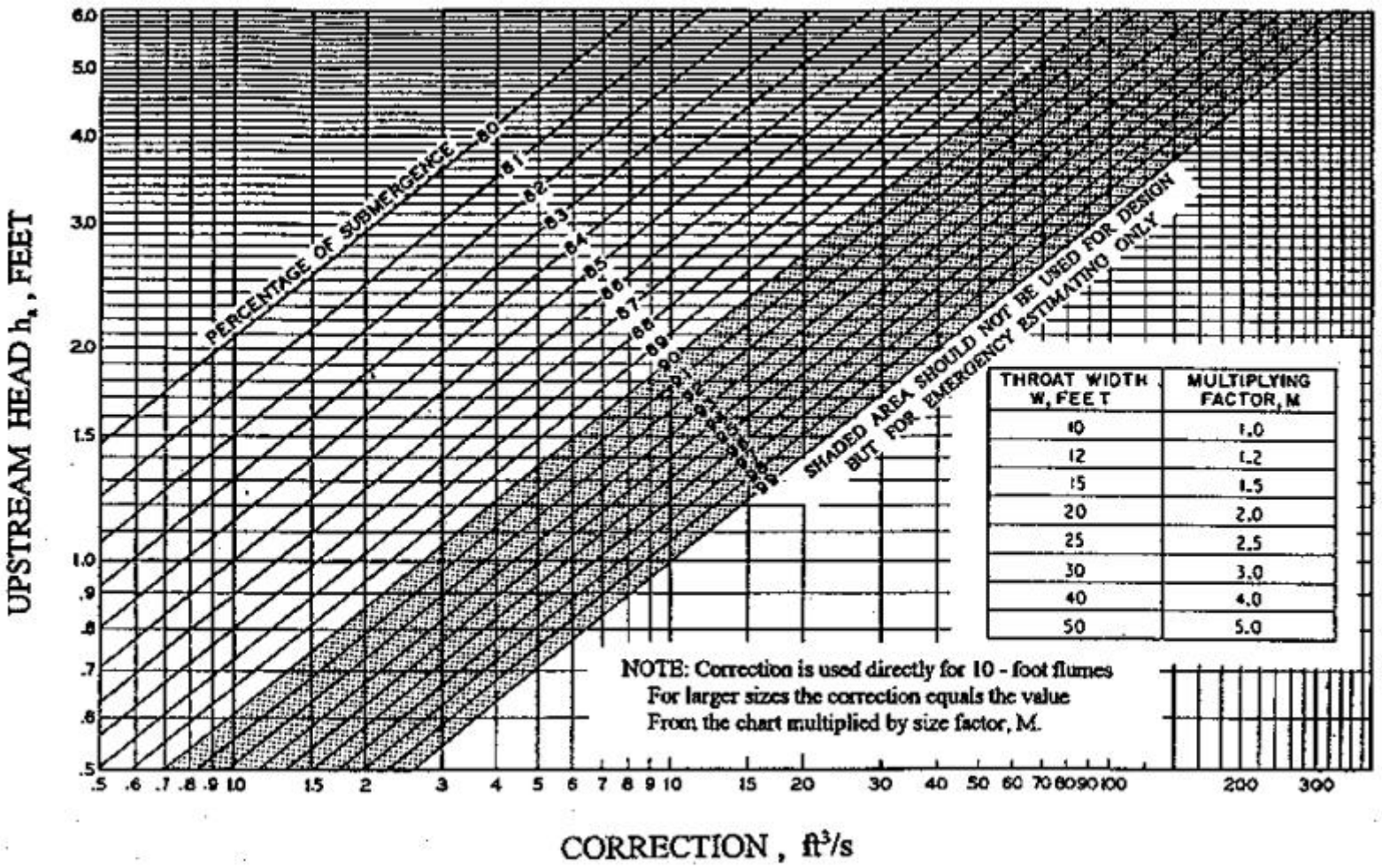
2. การไหลแบบท่วมจม (Submerged Flow Condition)

ถ้าหากเกิดการไหลแบบท่วมจม อัตราการไหลจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสูตรในตารางที่ 9.2 ดังนั้นจะต้องหักค่าที่คำนวณได้จากสูตรดังกล่าวออกจำนวนหนึ่ง จึงจะได้ค่าอัตราการไหลที่ถูกต้อง

สำหรับพาร์แชลฟลูมขนาด 1-8 ฟุต ค่าที่จะต้องหักออกนี้ อาจจะอ่านค่าได้โดยตรงจากกราฟในภาพที่ 9.4a และ 9.4b ตามลำดับ



ภาพที่ 9.4a Submergence Correction for 1-8 Foot Flumes



THROAT WIDTH W, FEET	MULTIPLYING FACTOR, M
10	1.0
12	1.2
15	1.5
20	2.0
25	2.5
30	3.0
40	4.0
50	5.0

ภาพที่ 9.4b Submergence Correction for 10 to 50 Foot Flumes

สำหรับ Flume ขนาดใหญ่กว่า 1 ฟุต แต่ไม่เกิน 10 ฟุต ค่าที่จะต้องนำมาแก้ไขนั้น หาได้โดยการอ่านค่าจากภาพที่ 9.4a แล้วนำมาคูณด้วย Correction Factor ตามตารางที่ 9.3

ตารางที่ 9.3 Correction Factor สำหรับพาร์แชลฟลูมขนาด 1-10 ฟุต

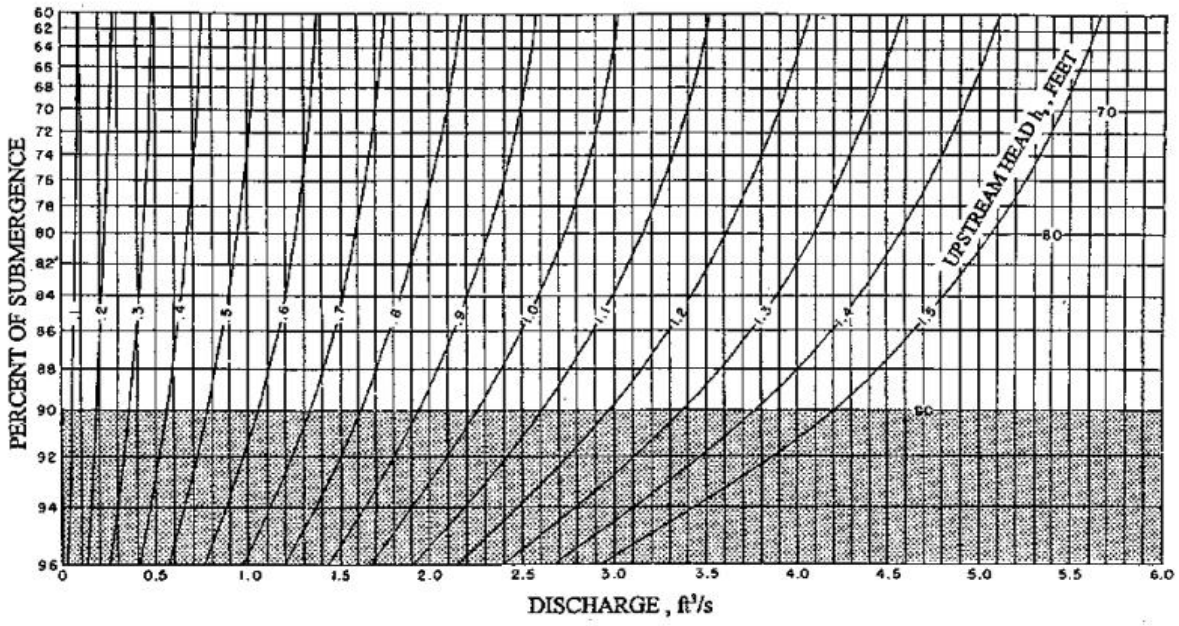
Side of Flume, W (ft.)	Correction Factor
1	1.0
1.5	1.4
2	1.8
3	2.4
4	3.1
6	4.3
8	5.4

สำหรับ Flume ขนาดใหญ่กว่า 10 ฟุตขึ้นไป ค่าที่จะต้องเอาไปแก้ไขคือค่าที่อ่านจากภาพที่ 9.4b คูณด้วย Correction Factor ในตารางที่ 9.4

ตารางที่ 9.4 Correction Factor สำหรับพาร์แชลฟลูมขนาดใหญ่กว่า 10 ฟุต

Side of Flume, W (ft.)	Correction Factor
10	1.0
12	1.2
15	1.5
20	2.0
25	2.5
30	3.0
40	4.0
50	5.0

สำหรับ Flume ขนาด 9 ฟุต ค่าอัตราการไหลในกรณีที่เป็น Submerged Flow อาจอ่านค่าได้โดยตรงจากภาพที่ 9.5



ภาพที่ 9.5 อัตราการไหลในกรณีที่เป็น Submerged Flow สำหรับ Flume ขนาด 9 ฟุต

- การสูญเสียพลังงาน

เมื่อน้ำไหลผ่านพาร์แชลฟลูมย่อมจะเกิดการสูญเสียพลังงานขึ้น สำหรับพาร์แชลฟลูมขนาดใหญ่กว่า 1 ฟุตขึ้นไป ปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปนี้อาจหาได้จากภาพที่ 9.5

ในทางปฏิบัติค่าพลังงานที่สูญเสียไปนี้จะประมาณใกล้เคียงหรือเท่ากันกับความแตกต่างของระดับน้ำตรงปากทางเข้าและปากทางออก

การติดตั้งพาร์แชลฟลูมจะทำให้ระดับน้ำในคลองทางด้านเหนือน้ำเอ่อสูงขึ้น แต่ระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำจะคงสภาพเดิมตามธรรมชาติ

- การออกแบบพาร์แชลฟลูม

การออกแบบในที่นี้จะหมายถึงการเลือกขนาด และตำแหน่งของสัน (Crest) ให้เหมาะสมกับสภาพของลำธาร หรือคลองที่เราต้องการจะวัดอัตราการไหล

โดยทั่วไปเราจะเลือกขนาดของพาร์แชลฟลูมและจัดวางสันให้อยู่ในระดับซึ่งจะทำให้น้ำไหลผ่านแบบอิสระได้ ทุกค่าของอัตราการไหลถ้าหากทำไม่ได้ก็จำเป็นต้องยอมให้เกิดการไหลแบบ Submerged Flow ได้ โดยเฉพาะที่ค่าอัตราการไหลสูง ๆ อย่างไรก็ตาม ค่า Degree of Submergence ไม่ควรเกินกว่า 95%

วิธีการทดลอง

- <u>การออกแบบพาร์แชลฟลูมเพื่อให้เกิดการไหลแบบอิสระ (Free Flow)</u>

วิธีการเลือกขนาดและระดับของสันของพาร์แชลฟลูม เพื่อให้การไหลเป็นแบบอิสระมีขั้นตอนดังนี้คือ

1) กำหนดอัตราการไหลสูงสุดที่จะวัด

2) หาความลึกของน้ำในคลองเมื่อเกิดการไหลตามข้อ 1)

3) หาระดับสูงสุดที่ยอมให้น้ำเอ่อขึ้นถึงได้ (Highest Water Level)

4) เลือกขนาดของพาร์แชลฟลูม ควรเลือกให้ความกว้างของคอคอดประมาณ 1/3 ถึง 1/2 เท่าของความกว้างของคลอง

5) จากสูตรสำหรับพาร์แชลฟลูมมาตรฐาน คำนวณหาค่า H_a สำหรับอัตราการไหลสูงสุดได้

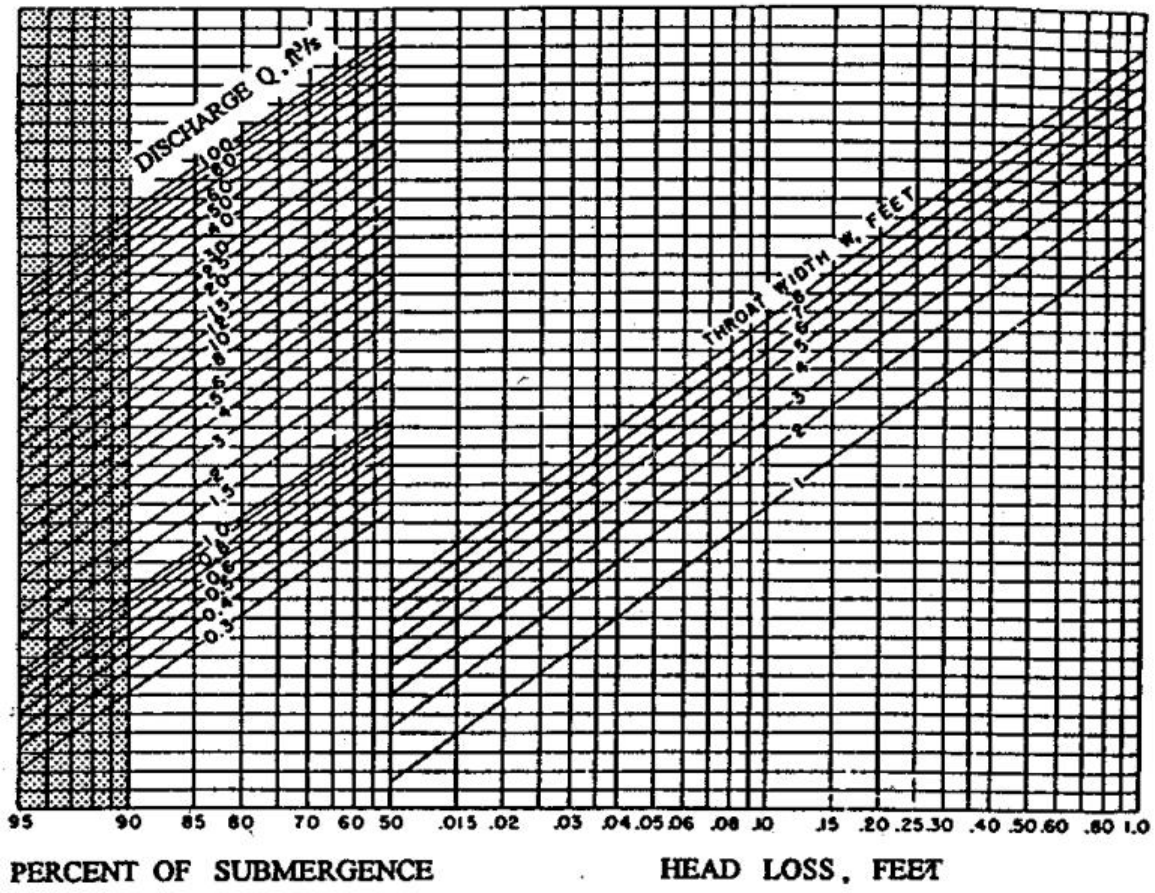
6) พิจารณาว่าค่า Transition Submergence ของฟลูมที่เลือกควรมีค่าเท่าใด เมื่อได้แล้วจึงคำนวณค่า H_b

7) ตั้งระดับสันของ Flume ให้อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำในข้อ 2) เป็นระยะ H_b

8) คำนวณหา Energy Loss จากภาพที่ 9.6

9) ระดับน้ำในคลองก่อนจะไหลเข้า Flume จะเอ่อสูงกว่าระดับในข้อ 2) เป็นระยะเท่ากับค่า Energy Loss ที่หาได้จากข้อ 8)

10) ตรวจสอบระดับในข้อ 9) จะเกินค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ในข้อ 3) หรือไม่ ถ้าเกินควรเลือกขนาด Flume ใหม่ให้ใหญ่ขึ้นกว่าเดิม



ภาพที่ 9.6 กราฟการสูญเสียแรงดัน (Energy Loss)

- การออกแบบพาร์แชลฟลูมเพื่อให้เกิดการไหลแบบท่วมจม (Submerged Flow)

ถ้าหากการติดตั้งพาร์แชลฟลูมเพื่อให้ได้ลักษณะการไหลแบบอิสระไม่อาจกระทำได้ เนื่องจากสาเหตุบางประการเช่น จะทำให้ระดับน้ำในคลองเอ่อสูงเกินที่กำหนดไว้ เป็นต้น อาจจำเป็นต้องออกแบบให้เกิดการไหลแบบท่วมจมขึ้น ขั้นตอนในการออกแบบมีดังนี้

1) กำหนดอัตราการไหลสูงสุดที่จะวัด

2) หาระดับน้ำที่อัตราการไหลสูงสุดนี้

3) หาระดับน้ำสูงสุดที่ยอมให้เอ่อขึ้นถึงได้

4) ผลต่างของระดับในข้อ 3) และข้อ 2) คือค่า Energy Loss ที่มากที่สุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้

5) จากภาพที่ 9.6 สามารถเลือกขนาดของ Flume ที่จะยอมให้น้ำไหลได้ตามอัตราในข้อ 1) โดยมี Energy Loss ตามข้อ 5) ในขณะเดียวกันก็วสามารถกำหนดค่า Degree of Submergence สูงสุดได้ด้วย สมมุติเป็น X

6) สมมุติยกระดับสันสูงจากพื้นคลองเป็นระยะ Z ความลึกของน้ำจากพื้นคลองถึงระดับน้ำสูงสุดตามข้อ 3) เป็น Z_A ความลึกของน้ำจากพื้นคลองถึงระดับน้ำตามข้อ 2) เป็น Z_B

จะได้ $H_a = Z_A - Z$

$H_b = Z_B - Z$

$$\therefore \frac{H_a}{H_b} = \frac{Z_A - Z}{Z_B - Z}$$

7) จากข้อ 6) สามารถคำนวณหาค่า Z ซึ่งเป็นความสูงจากระดับพื้นถึงระดับสันของพาร์แชลฟลูมได้

ก่อนจะเริ่มทำการทดลองให้ทำการวัดขนาดของพาร์แชลฟลูมโดยละเอียดแล้ว จึงเริ่มทำการทดลองตามลำดับขั้นดังนี้

1) เปิดเครื่องสูบน้ำและเปิด Gate Valve ให้น้ำไหลเข้ารางโดยเริ่มเปิดแต่น้อยก่อน

2) รอจนระดับน้ำคงที่ แล้วจึงอ่านค่า H_a ควรจะเริ่มต้นที่ค่า H_a ประมาณ 6 เซนติเมตร

3) วัดอัตราการไหล โดยการปิดทางน้ำออกของถังวัด แล้วจับช่วงเวลาที่น้ำเพิ่มระดับจากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง ทำดังนี้ 3 ครั้ง แต่ละครั้งควรจับเวลาให้เกินกว่า 10 วินาทีขึ้นไปแล้วหาค่าเฉลี่ย

4) ค่อย ๆ ปิดบานประตูน้ำทางด้านท้ายราง (Tailgate) จะสังเกตเห็น Hydraulic Jump เกิดขึ้น และค่อย ๆ เคลื่อนเข้าสู่บริเวณคอคอด รอจนระดับน้ำคงที่ แล้วจึงอ่านค่า H_a, H_b

5) ปิดบานประตูน้ำลงอีก H_b, H_a จะเปลี่ยนแปลง รอจนระดับน้ำทั้งสองแห่งคงที่ จึงอ่านค่า

6) ทำซ้ำข้อ 5) จนได้ค่า H_b, H_a 3 ค่า สำหรับค่าอัตราการไหล 1 ค่า

7) ย้อนกลับไปทำจาก 1)-6) ใหม่ โดยค่อย ๆ เปิด Gate Valve เพิ่มขึ้น

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 9.5 อัตราการไหลโดยพาร์แชลฟลูม

W	A	B	C	D	E	F	G	K	N	M	P

Run No.	Δ cm^3	Δt (Sec)				Q cm^3/sec	Free Flow			Submerged Flow			Remark
		Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4		H_a cm	H_b cm	H_b/H_a cm	H_a cm	H_b cm	H_b/H_a cm	

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) พล๊อตค่า Q กับ H_a สำหรับการไหลแบบอิสระลงบนกระดาษกราฟธรรมดา

2) พล๊อตค่า Q กับ H_a สำหรับกสนไหลแบบอิสระลงบนกระดาษกราฟ Log-Log Scale คำนวณหาค่า K และ N จากกราฟนี้

3) คำนวณค่า Q_1 จากสูตรสำหรับพาร์แชลฟลูมขนาด 12 นิ้ว โดยแทนค่า W = 1¼ ฟุต แล้วพล๊อตลงในกราฟของข้อ 1) เปรียบเทียบความแตกต่างและทำการเปลี่ยนหน่วย

4) สำหรับการไหลแบบท่วมจมให้พล๊อตค่า Q กับค่า $\frac{H_a}{H_b}$ สำหรับแต่ละค่า H_a ดังตัวอย่างในภาพที่ 9.5

5) อ่านค่า Q, H_b ที่ค่า H_a ต่าง ๆ จากภาพที่ 9.5 แล้วนำมาพล๊อตเปรียบเทียบกับกราฟจากข้อ 4) และทำการเปลี่ยนหน่วย

เอกสารอ้างอิง

โครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2549.

คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ EGCE 322 Hydraulic Engineering.

บทปฏิบัติการที่ 10

การไหลสม่ำเสมอในทางน้ำเปิด

(Uniform Channel Flow)

วัตถุประสงค์

เพื่อเรียนรู้ลักษณะการไหลสม่ำเสมอของน้ำในทางน้ำเปิด ความเร็วเฉลี่ยของน้ำและทิศทางการไหลของน้ำในทางน้ำเปิด ตลอดจนทราบถึงการหาค่าความต้านทานการไหลของน้ำในทางน้ำเปิดซึ่งอยู่ในเทอมของค่าเชซซี (Chezy'C) และค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่ง (Manning'n)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ช่องทางน้ำพลาสติกใส่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดยาว 5 เมตร พื้นที่หน้าตัดคงที่ ซึ่งสามารถปรับความลาดชันของพื้นทางน้ำได้

2) ฝายควบคุมการไหลที่ท้ายน้ำ

3) เครื่องสูบน้ำ ซึ่งสามารถส่งน้ำให้ได้สม่ำเสมอ

4) ประตูควบคุมปริมาณน้ำก่อนเข้า

5) ตาชั่งและถังวัดปริมาณน้ำ

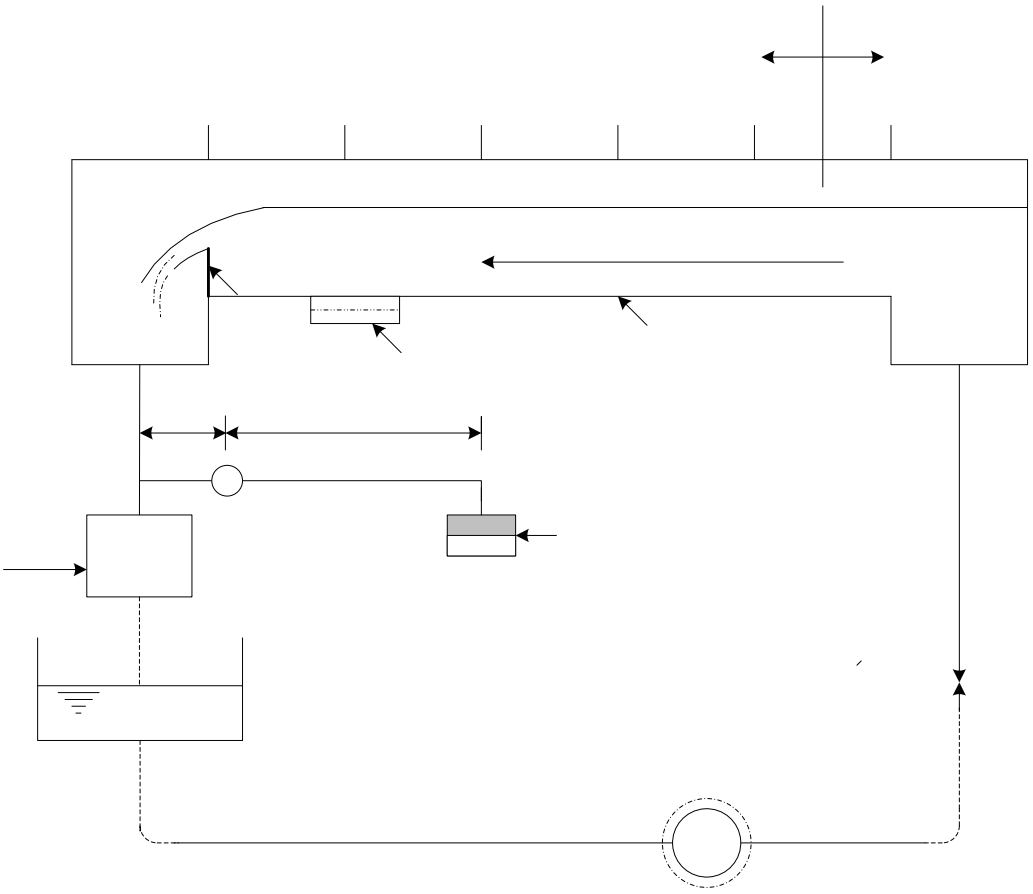
6) เกจวัดความลึก

7) ลูกน้ำช่างไม้ เพื่อตรวจสอบทิศทางเฉียงของช่องทางน้ำ

8) ไม้บรรทัด

สำหรับรายละเอียดของชุดทดสอบการไหลสม่ำเสมอในทางน้ำเปิด และแผนผังการจัดเครื่องมือทดลองแสดงไว้ในภาพที่ 10.1 และภาพที่ 10.2 ตามลำดับ

ภาพที่ 10.1 ชุดทดสอบการไหลสม่ำเสมอในทางน้ำเปิด



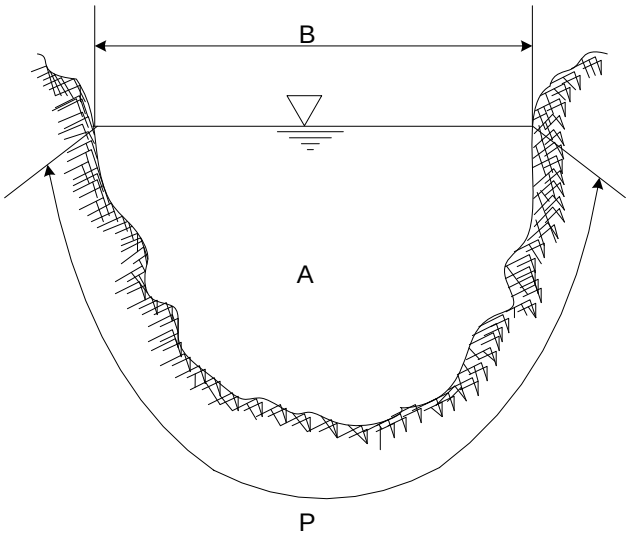
ภาพที่ 10.2 แผนผังการจัดเครื่องมือทดลอง

ทฤษฎี

ของเหลวซึ่งไหลโดยผิวบนสัมผัสกับอากาศเป็นแบบหนึ่งของการไหลที่เป็นประยุกต์ทางด้านวิศวกรรม เช่น การไหลของน้ำในคลองธรรมชาติ ในท่อระบายน้ำทางด้านชลประทาน

ซึ่งการไหลของน้ำดังกล่าวเกิดเนื่องมาจากแรงแรงดึงดูดหรือเนื่องมาจากน้ำหนักของน้ำเอง ก่อนอื่นควรทราบคำจำกัดความเกี่ยวกับรูปร่างหน้าตัดของคลองตามภาพที่ 10.3 ดังนี้

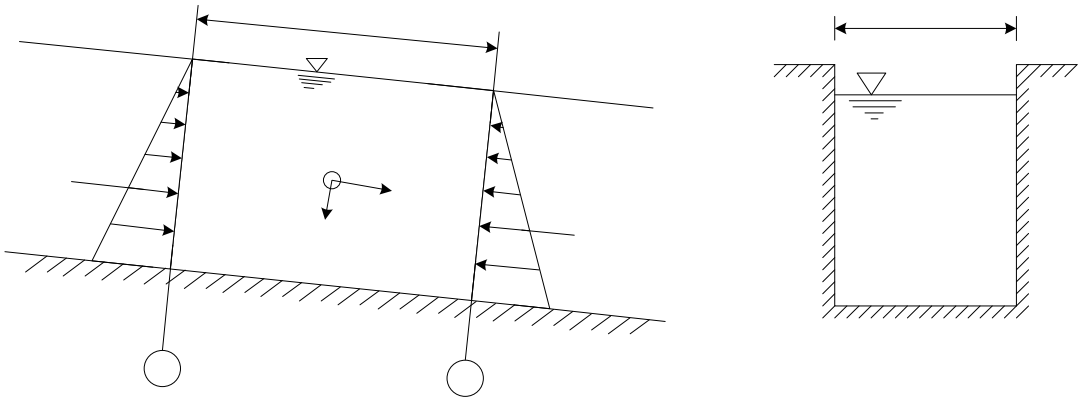
A = พื้นที่หน้าตัดของคลองที่มีน้ำไหล
B = ความกว้างบนของคลอง
Y = ความลึกของคลอง
P = ความยาวของพื้นคลองตามขวางซึ่งเป็นขอบเปียก
R = รัศมีไฮดรอลิค (Hydraulic Radius) = A/P



ภาพที่ 10.3 รูปตัดลำน้ำแสดงค่าต่าง ๆ

❑ สูตรของเชซซี (Chezy Formula)

พิจารณาการไหลของน้ำผ่านคลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามภาพที่ 10.4



ภาพที่ 10.4 ไดอะแกรมอิสระ (Free Body Diagram) ของลำน้ำ

เนื่องจากการไหลของน้ำในลำคลองกำหนดให้เป็นแบบสม่ำเสมอกล่าวคือ ความเร็วของน้ำในคลองมีค่าคงที่ ทั้งส่วนหน้าตัดที่ 1 และที่ 2 ดังนั้นความลึกของน้ำในคลอง $y_1 = y_2$ และความเร่งในทิศทางการไหลของน้ำตามคลองมีค่าเป็นศูนย์

การสมดุลในทิศทางการไหล

$$\sum F = 0$$

$$F_1 - F_2 + \rho g V \sin\alpha = \tau PL = 0$$

แต่แรง F_1, F_2 มีค่าขึ้นอยู่กับความลึกของน้ำในคลองซึ่งมีค่าเท่ากัน

$$\rho g V \sin\alpha = \tau PL$$

แทนค่า V = ปริมาตรของน้ำ = $A \times L$

$$\rho g AL \sin\alpha = \tau PL$$

$$\tau = \rho g A/P \sin\alpha$$

$$\tau = \rho g R \sin\alpha$$

ซึ่ง

τ = ความเค้นเฉือนเนื่องจากความเสียดทาน (Friction Shear Stress)

$S_o = \sin\alpha$ = ความลาดของก้นคลอง

ดังนั้น $\tau = \rho g R S_o$ ----------(10.1)

ซึ่งเป็นสมการแสดงค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) ของคลองเมื่อการไหลเป็นแบบสม่ำเสมอ การที่น้ำหรือของไหลผ่านวัตถุจะเกิดแรงฉุด (Drag Force) ที่พื้นคลองดังสมการต่อไปนี้

$$F_f = f \rho PL v^2 / 2$$ ----------(10.2)

เมื่อ

$$\{A = PL\}\ F_f = f \rho A v^2 / 2$$ ----------(10.3)

F_f = เป็นแรงฉุด (Drag Force)

f = เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

v = ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในคลอง

สมการ (10.1)×A = สมการ (10.2) จะได้

$$\rho g R S_o A = f \rho A v^2 / 2$$

$$f v^2 / v^2 = g R S_o$$

$$v^2 = 2g / f R S_o$$

$$v = \sqrt{2g/f}.\sqrt{RS_o}$$

$$v = C\sqrt{RS_o} \qquad \text{----------(10.4)}$$

สมการนี้เรียกว่าสมการของเชซี (Chezy equation)

เมื่อ

v = ความเร็วเฉลี่ย = Q/A

$C = \sqrt{2g/f}$ = สัมประสิทธิ์ของเชซซี (Chezy's Coefficient)

R = รัศมีไฮดรอลิค (Hydraulic Radius)

S_o = ความลาดที่พื้นที่คลองหรือผิวน้ำ

สมการที่ 10.4 อังตวน เชซซี (Antonie Chezy) วิศวกรชาวฝรั่งเศสเป็นผู้ที่หาได้จากการทดลองในแม่น้ำเซน (River Seine) ในปี ค.ศ.1669 โดยที่ v เป็นอัตราเร็วเฉลี่ยมีหน่วยเป็นเมตร/วินาที R มีหน่วยเป็นเมตร และ S เป็นความลาดของเส้นพลังงาน เมื่อมีการไหลเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform Flow) แต่ถ้าการไหลสม่ำเสมอ S เป็นความลาดของพื้นคลองหรือผิวน้ำหรือเส้นพลังงาน เนื่องจากความลาดมีค่าเท่ากัน

ค่าเชซซี (Chezy'C) เป็นค่าแสดงความต้านทานซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดของคลอง ค่าเรโนลด์ (Reynold Number, $\rho vL/\mu$) และการวางแนวคลอง

อย่างไรก็ตามแม้ว่าในตอนแรกของสมการ $v = c\sqrt{RS}$ ที่พบจากการทดลองจะเป็นสูตรความชำนาญงาน (Empirical) แต่ภายหลังก็สามารถพิสูจน์โดยการวิเคราะห์ (Empirical Formula) ได้

❑ <u>สูตรของแมนนิ่ง (Manning Formula)</u>

ในปี ค.ศ. 1889 โรเบิร์ต แมนนิ่ง (Robert Manning) วิศวกรชาวไฮริชได้หาสมการแสดงค่าความเร็วของน้ำในคลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ

$$v = (1/n)R^{2/3}S^{1/2} \qquad \text{----------(10.5)}$$

เมื่อ

n = ค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่ง (Manning's Coefficient)
R = รัศมีไฮดรอลิค (Hydraulic Radius)
S = ความลาดของเส้นพลังงานทั้งหมด

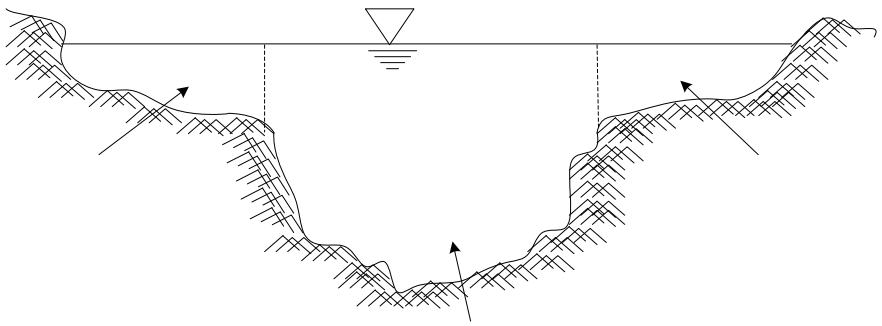
เมื่อเปรียบเทียบสมการ (10.4) และ (10.5) จะได้

$$C = R^{1/6}/n \qquad \text{----------(10.6)}$$

ค่าของแมนนิ่ง เอ็น (Manning'n) ขึ้นอยู่กับความลาดชั้นของพื้นคลอง การวางแนวคลองดังภาพที่ 10.5 เนื่องจาก V มีค่าน้อยที่พื้นที่ราบน้ำท่วม (Flood Plain) ทำให้ค่า n มีค่ามากขึ้นในขณะที่ในส่วนที่เป็นลำน้ำมีค่า n น้อยลงเนื่องจากความเร็วเพิ่มขึ้น และสมการการไหลทั้งหมดหาได้ดังนี้

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \qquad \text{----------}$$

(10.7)



ภาพที่ 10.5 การไหลของน้ำหลากผ่านพื้นที่ราบน้ำท่วม

ในการสร้างคลองส่งน้ำงบประมาณค่าก่อสร้างขึ้นอยู่กับค่าขุดคลองและการวางแนวคลองการที่จะทำให้เสียค่าขุดคลองน้อยจะต้องออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดและเส้นขอบเปียกมีค่าน้อยและรับอัตราการไหลได้ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งแสดงได้จากสมการ

$$Q = Av \qquad \text{----------(10.8)}$$

จาก $v = 1/nR^{2/3}S^{1/2}$ และ $R = A/P$ นำไปแทนค่าในสมการ (10.8) แล้วหาค่า A จะได้

$$A = [nQ/S^{1/2}]3/5[P]^{2/3} \qquad \text{----------(10.9)}$$

เนื่องจาก Q, n, S มีค่าคงที่ ดังนั้นถ้า P มีค่าน้อย A ก็มีค่าน้อยด้วย โดยที่ Q มีค่าคงเดิม เราเรียก A ในลักษณะนี้ว่ารูปหน้าตัดไฮดรอลิคที่ดีที่สุด (The Best Hydraulic Section)

สำหรับคลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เกิดขึ้นเมื่อ

$$P = B+2y = A/y+2y$$

$$dP/dy = -A/y^2 +2 = 0$$

$$B = 2y$$

วิธีการทดลอง

1) วัดความกว้างของช่องทางน้ำ ตรวจสอบความลึกของช่องทางน้ำจากเกจวัดความลึกว่าในตำแหน่งต่าง ๆ กันของความยาวคลอง ควรจะได้ค่าความลึกเท่ากัน แสดงว่าแนวปากทางน้ำขนานกับพื้น

2) ปรับความลาดชันของคลองให้ท้ายน้ำต่ำกว่าเหนือน้ำ และให้การไหลเป็นต่ำกว่าวิกฤต (Subcritical) คือ Y_n, Y_c

3) เปิดสวิตซ์สูบน้ำ และขังน้ำไว้ในช่องทางน้ำเพื่อวัดความลาดชัน ปิดสวิตซ์กั้นฝ่ายควบคุมทางท้ายน้ำ และปิดประตูน้ำเหนือรอจนระดับน้ำนิ่งแล้วอ่านเกจวัดความลึกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ถ้าช่องทางน้ำลาดมาทางท้ายน้ำอย่างที่ต้องการค่าที่อ่านได้ท้ายน้ำจะน้อยกว่าค่าที่อ่าน

ได้จากเหนือน้ำ (ระดับผิวน้ำในคลองช่องทางจะอยู่ในแนวราบ) และลูกน้ำช่างไม้จะอยู่ค่อนไปทางเหนือน้ำเล็กน้อย ค่าความลาดชั้นของช่องทางน้ำจะคิดได้จากตัวเลขเหล่านี้

4) ดันฝ่ายควบคุมท้ายน้ำให้ต่ำลงไป แล้วเดินเครื่องให้น้ำผ่านช่องทางน้ำ เปิดประตูน้ำจนสุดแล้วปรับฝ่ายควบคุมจนกระทั่งน้ำที่ไหลในคลองมีความลึก Y_n เท่ากันตลอด เพื่อให้ง่ายในการปรับใช้ไม้บรรทัดวัดความลึกของน้ำในช่องทางน้ำโดยประมาณ แล้วจดตัวเลขนี้ไว้ด้วยเพื่อตรวจสอบจากที่คำนวณได้จากเกจวัดความลึก เมื่อปรับความลึกของน้ำที่ไหลในช่องทางน้ำจนเท่ากันและรอจนการไหลคงที่แล้ว อ่านค่าจากเกจวัดความลึก วัดอัตรากรไหลของน้ำซึ่งมีค่า Y_n เท่ากับที่อ่านได้ โดยใช้การจับเวลาจากการที่ตาชั่งเริ่มสมดุลย์ครั้งแรกหลังจากปิดก้นถังหลังจากใสน้ำหนักแล้วตาชั่งสมดุลย์อีกครั้ง น้ำหนักของเครื่องชั่งเฉพาะเครื่องน้ำเขียนบ่งไว้เป็น 3 เท่า ของน้ำหนักจริง ๆ แล้ว เพื่อแก้กับการที่ระยะระหว่างถังกับจุดหมุนของตาชั่ง เป็นหนึ่งในสามเท่าของของระยะจากจุดหมุนของตาชั่งไปยังที่ถ่วงน้ำหนัก

4) การจับเวลาควรใส่น้ำหนักให้มากพอที่จะจับเวลาได้ประมาณ 15 วินาที มิฉะนั้นการทดลองอาจผิดพลาดได้ในช่วงเวลาสั้น ๆ ของการจับเวลาเพราะการกดนาฬิกาจับเวลาและการหยุดจับเวลาจะมีอิทธิพลต่อช่วงเวลาที่ได้มากเกินไป

5) ทำการทดลองวิธีเดียวกันนี้ประมาณ 6 ครั้ง เริ่มจากน้ำไหลสูงสุดดังกล่าว เมื่อเสร็จการทดลองครั้งแรก แล้วปิดประตูควบคุมน้ำเล็กน้อย เพื่อให้น้ำผ่านช่องทางน้ำลง แล้วไปปรับฝ่ายควบคุมท้ายน้ำจนความลึกของน้ำในช่องทางน้ำคงที่ โดยใช้ไม้บรรทัดอ่านค่าโดยประมาณช่วยด้วยและจดไว้ต่างหาก เพื่อตรวจสอบเมื่อเสร็จการทดลองปิดสวิตช์

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 10.1 ผลการวัดความลาดชันของท้องคลอง (Bed Slope)

ผลการวัด	จุดวัดที่				
	1	2	3	4	5
ระยะจากที่ออกของช่องทางน้ำ, ม. (Distance Upstream of Channel Outlet, m)					
การวัดด้วยเกจวัดความลึก, มม. (Depth Gauge Measurement, mm)					
ความลึกของท้องคลองต่ำกว่าเดตัม, มม. (Depth to Channel Bed below Datum, mm)					
ความลาดของท้องคลอง (Gradient of Channel Bed Slope)					

ตารางที่ 10.2 ผลการวัดการไหลแบบสม่ำเสมอ

การทดลองที่	น้ำหนักน้ำ (kg)	ปริมาตร (m^3)	เวลา (Sec)	ความลึกเกจ (mm)	ความลึก Yn (m)
1					
2					
3					
4					
5					
6					

ตารางที่ 10.3 Chezy and Manning'n Value

การทดลองที่	อัตราการไหล, Q (cms)	ความเร็ว, v (cms)	รัศมีไฮดรอลิค, R (m)	$(RS_o)^{1/2}$	$R^{2/3}S_0^{1/2}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณหาอัตราการไหลของการไหลในทางน้ำเปิด

2) ทำการพล๊อตกราฟระหว่างค่าความเร็วกับค่า $(RS_o)^{1/2}$ ที่ได้จากการทดลอง และกราฟระหว่างค่าความเร็วกับค่า $R^{2/3}S_0^{1/2}$ เพื่อวิเคราะห์หา Slope ของแต่ละกราฟซึ่งก็คือค่าสัมประสิทธิ์ของเชซซี (Chezy's Coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่ง (Manning's Coefficient) ของทางน้ำเปิด ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

โครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2549.

คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ EGCE 322 Hydraulic Engineering Laboratory.

ไตรรัตน์ ศรีวัฒนา, ชูเกียรติ ทรัพย์ไพศาล และพงษ์ศักดิ์ เสริมสาธนสวัสดิ์. 2524. **ปฏิบัติการทางชลศาสตร์**. เอกสารวิชาการ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Essom Company Limited. 1999. **Technical Training Equipment**.

บทปฏิบัติการที่ 11

การไหลวนแบบบังคับ

(Forced Vortex Flow)

วัตถุประสงค์

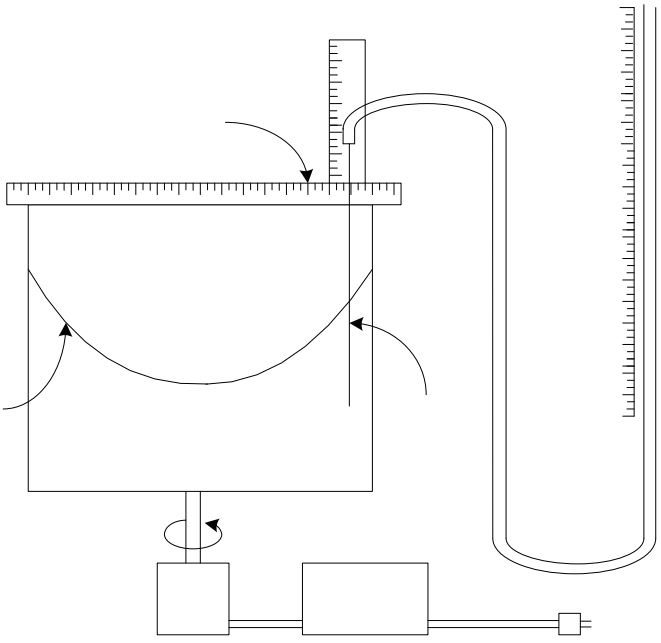
เพื่อหารูปตัดผิวอิสระ (Surface Profile) และการกระจายของพลังงานทั้งหมด ของการไหลวนแบบบังคับ

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ถังใส่รูปทรงกระบอกเปิด หมุนได้รอบแกนตั้ง

2) มอเตอร์ไฟฟ้า เปลี่ยนความเร็วได้เพื่อหมุนถังใสนี้

3) หลอดปิโตด (Pitot Tube) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องวัดความลึก (Depth Gauge) วางบนคานซึ่งมีขีดบอกระยะแนวนอนและสเกลแนวตั้ง หลอดปิโตดนี้สามารถเลื่อนไปมาได้ตลอดความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังใส และเลื่อนขึ้นลงได้ตั้งแต่กันถังใสจนถึงคานบน ดังแสดงในภาพที่ 11.1



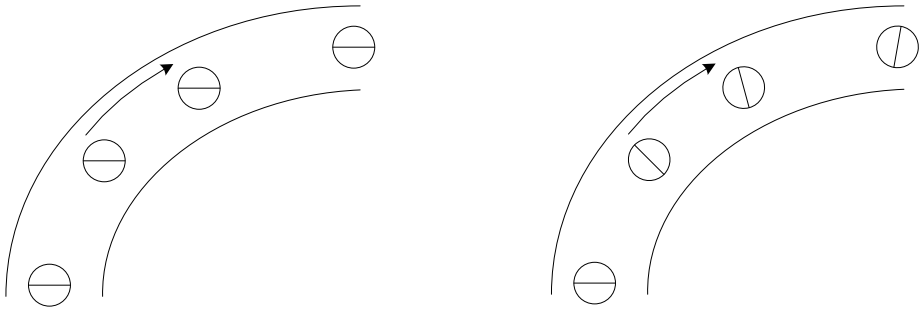
ภาพที่ 11.1 แผนผังการจัดเครื่องมือ

4) น้ำสะอาด

5) นาฬิกาจับเวลา

ทฤษฎี

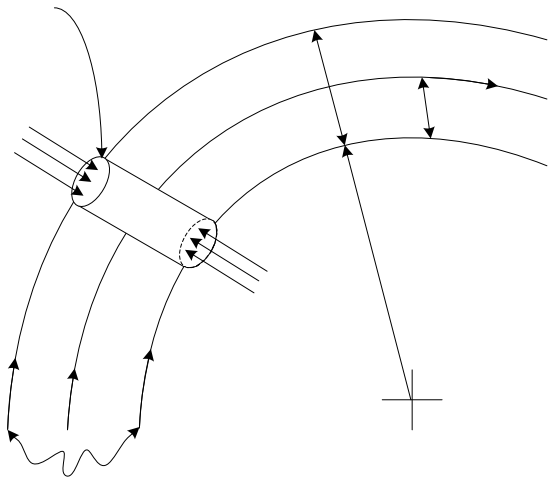
การไหลวนแบบบังคับคือ การที่ของไหลไหลวนรอบแกนดิ่ง โดยมีแรงบังคับให้การไหลวนนั้นสม่ำเสมออยู่ตลอดเวลา การไหลวนแบบบังคับนี้จะไม่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคของของไหลนั่นคือ อนุภาคของการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมเดียวกัน ซึ่งการไหลแบบนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่ง การไหลแบบอนุภาคไม่หมุน (Irrotational)



a) อนุภาคไม่หมุน (Irrotational) b) อนุภาคหมุน (Rotational)

ภาพที่ 11.2 การไหลแบบอนุภาคไม่หมุนและอนุภาคหมุน

- การเปลี่ยนแปลงความดันตามแนวรัศมีในระนาบราบของสตรีมไลน์ (Streamlines) โค้ง



ภาพที่ 11.3 การไหลเข้าโค้ง

จากภาพที่ 11.3 ของไหลที่ไหลอยู่ระหว่างสตรีมไลน์ 2 เส้น ซึ่งมีรัศมี r และ r+dr ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามกันจาก p เป็น p+dp โดยความเร็วเปลี่ยนจาก v เป็น v+dv และพลังงานทั้งหมดเปลี่ยนจาก H เป็น H+dH

เมื่ออยู่ในสมดุลย์จะได้

แรงหนีศูนย์กลาง = ความแตกต่างของแรงดันที่กระทำต่อสตรีมไลน์ทั้งสอง

จะได้

$$\frac{\rho dA \times dr\left(v+\frac{(dv)}{2}\right)^2}{r+\frac{dr}{2}} = (p+dp)dA-pdA$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นมวลของของไหล

จัดรูปใหม่จะได้

$$dp \times dA = \frac{\rho dA \times dr\left(v+\frac{dv}{2}\right)^2}{r+\frac{dr}{2}}$$

หรือ

$$\frac{dp}{d'r} = \frac{\rho\left(v+\frac{dv}{2}\right)^2}{r+\frac{dr}{2}}$$

ถ้า v และ r มีค่ามาก ๆ เมื่อเทียบกับ dv และ dr จะตัดค่า dv และ dr ดังนั้นสมการจะเหลือ

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho v^2}{r} \qquad \text{----------(11.1)}$$

สมการที่ 11.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันตามแนวรัศมีในระนาบของสตรีมไลน์ที่มีศูนย์กลางร่วมกัน

- <u>การเปลี่ยนแปลงความดันจากสตรีมไลน์เส้นหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่งในการไหลแบบบังคับ</u>

การเปลี่ยนแปลงความดันจากสตรีมไลน์ (1) ไปยัง สตรีมไลน์ (2) ในระนาบราบแทนได้ด้วยสมการ 11.1

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho v^2}{r}$$

หรือ

$$dp = \rho\omega^2 r \times dr \qquad \text{----------(11.2)}$$

เมื่อ

v = ความเร็วเชิงเส้น

ω = ความเร็วเชิงมุม

โดย

$v = \omega r$

สมการที่ 11.2 เมื่ออินติเกรดระหว่างสตรีมไลน์ (1) และ (2) จะได้

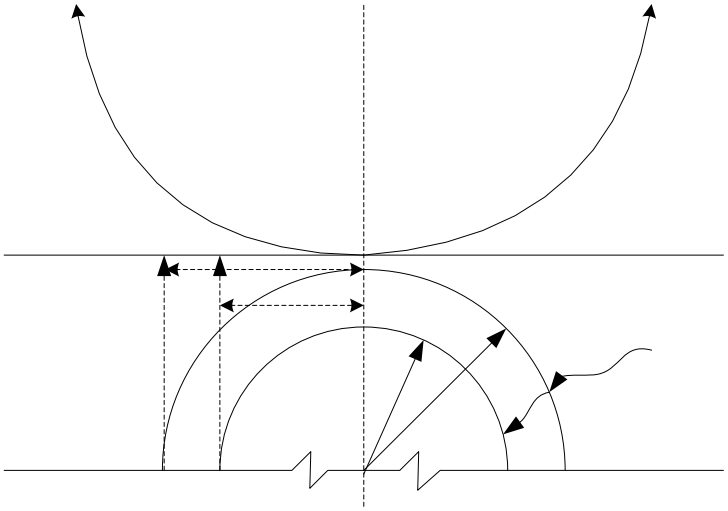
$$\int_1^2 dp = \rho\omega^2 \int_1^2 r dr$$

$$p_2 - p_1 = \rho\omega^2 \left(\frac{r_2^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} \right)$$

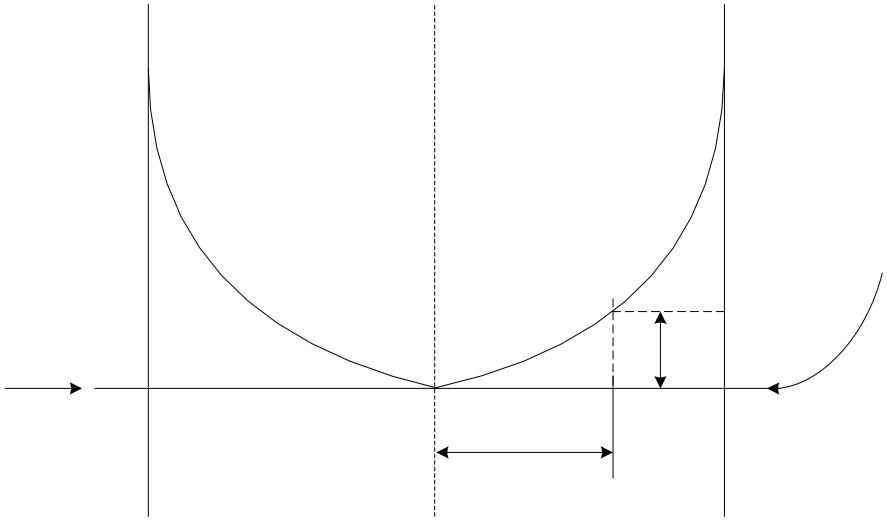
หารตลอดด้วย ρg จะได้

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{\omega^2 \left(r_2^2 - r_1^2 \right)}{2g} \qquad \text{----------(11.3)}$$

ซึ่งสมการพาราโบล่า



ภาพที่ 11.4 การไหลวนแบบบังคับ



ภาพที่ 11.5 การกระจายความดัน

จากภาพที่ 11.5 กำหนดให้ระนาบที่ผ่านจุดต่ำสุดของโค้งพาราโบล่า (จุดต่ำสุดของการไหลวน) เป็นระดับเปรียบเทียบ

เพราะฉะนั้นความดันแตกต่างระหว่างจุด A (ซึ่งอยู่ในระนาบราบที่ผ่านจุด 0 โดยอยู่ห่างจากจุด 0 ในแนวรัศมีเท่ากับ r) กับจุด 0 จะเป็น

$$\frac{p_A - p_0}{\rho g} = \frac{\omega^2}{2g}(r_A^2 - r_0^2) \qquad \text{----------(11.4)}$$

เมื่อ

r_o = 0

P_o = ความดันบรรยากาศ = 0 เมื่อคิดเป็นความดันเกจ

แทนค่าลงไป จะได้

$$\frac{p_A}{\rho g} = \frac{\omega^2 r_A^2}{2g}$$

แต่

$\frac{p_A}{\rho g}$ = ความลึกของน้ำจากผิวอิสระถึงจุด A

= Z_A

ดังนั้นสรุปได้ว่า ความดันในระนาบราบที่ผ่านจุดจะมากขึ้นตามความยาวรัศมี

ตัวอย่างของการไหลวนแบบบังคับนี้เช่น การไหลวนของน้ำในสูบน้ำแบบหอยโข่ง โดยทั่ว ๆ ไปสมการที่ 11.4 จะเขียนในรูป

$$\frac{p}{\rho g} = \frac{\omega^2 r^2}{2g} = Z \qquad \text{----------(11.5)}$$

❑ <u>การเปลี่ยนแปลงพลังงานทั้งหมดตามแนวรัศมีในระนาบราบของสตรีมไลน์เส้นโค้ง</u>

จากภาพที่ 11.3 จะได้

$$H + dH = \frac{p + dp}{\rho g} + \frac{(v + dv)^2}{2g} + Z$$

และ $$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + Z$$

เพราะฉะนั้น $$dH = (H + dH) - H = \frac{p + dp}{\rho g} + \frac{(v + dv)^2}{2g} + Z - \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + Z$$

$$= \frac{dp}{\rho g} + \frac{2v.dv}{2g} + \frac{dv^2}{2g}$$

เนื่องจาก dv มีค่าน้อย ฉะนั้น dv^2 มีค่าน้อยมากจนตัดทิ้งได้

ดังนั้น $$dH = \frac{dp}{\rho g} + \frac{2v.dv}{2g}$$

หารตลอดด้วย dr จะได้

$$\frac{dH}{dr} = \frac{1}{\rho g} \times \frac{dp}{dr} + \frac{v}{g} \times \frac{dv}{dr}$$

จากสมการที่ 11.1

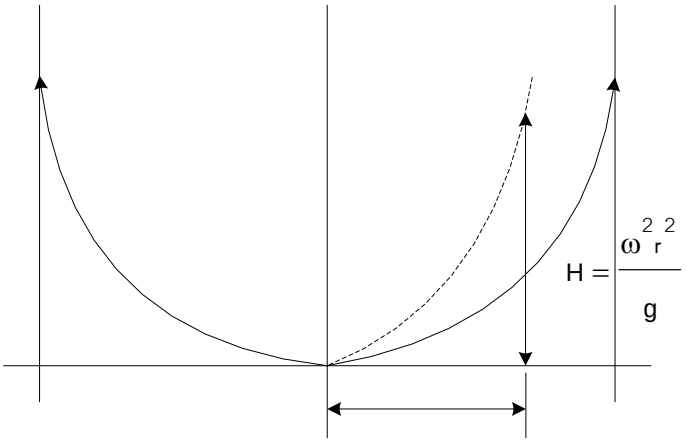
$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho v^2}{r}$$

$$\frac{dH}{dr} = \frac{v^2}{gr} + \frac{v}{g} \times \frac{dv}{dr}$$

หรือ $$\frac{dH}{dr} = \frac{v}{g}\left(\frac{v}{r} + \frac{dv}{dr}\right)$$ ----------(11.6)

สมการที่ 11.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานทั้งหมดตามแนวรัศมีในระนาบของสตรีมไลน์ที่มีศูนย์กลางร่วมกัน

- <u>การเปลี่ยนแปลงพลังงานทั้งหมดจากสตรีมไลน์เส้นหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่งในการไหลวนแบบบังคับ</u>



ภาพที่ 11.6 การกระจายพลังงานทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงพลังงาทั้งหมดจากสตรีมไลน์ (1) ไปยังสตรีมไลน์ (2) ในระนาบราบแทนด้วยสมการที่ 11.6

$$\frac{dH}{dr} = \frac{v}{g}\left(\frac{v}{r} + \frac{dv}{dr}\right)$$

เพราะว่า $v = \omega r$

หรือ $\frac{v}{r} = \omega$

และ $\frac{dv}{dr} = \omega$

แทนค่าลงไป จะได้

$$\frac{dH}{dr} = \frac{\omega r}{g}(\omega + \omega)$$

จะได้ $$\frac{dH}{dr} = \frac{2\omega^2 r}{g}$$

$$dH = \frac{2\omega^2 r.dr}{g} \qquad \text{----------(11.7)}$$

เมื่ออินติเกรตสมการที่ 11.7 ระหว่างสตรีมไลน์ (1) และ (2) จะได้

$$\int_1^2 dH = \frac{2\omega^2}{g}\int_1^2 r.dr$$

จะได้ $$H_2 - H_1 = \frac{2\omega^2\left(\frac{r_2^2}{2} - \frac{r_1^2}{2}\right)}{g}$$

หรือ $$H_2 - H_1 = \frac{\omega^2\left(r_B^2 - r_0^2\right)}{g} \qquad \text{----------(11.8)}$$

แต่ $r_o = 0$

และ $H_o = 0$

ดังนั้นแทนค่าลงไป จะได้

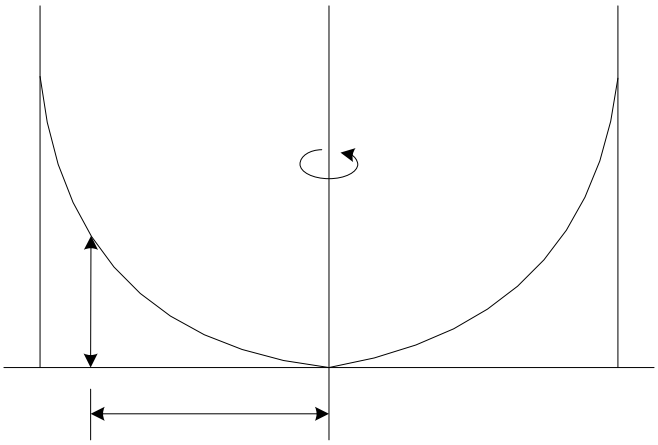
$$H_B = \frac{\omega^2 r_B^2}{g} \qquad \text{----------(11.9)}$$

หรือเขียนในรูปทั่ว ๆ ไป จะได้

$$H = \frac{\omega^2 r^2}{g} \qquad \text{----------(11.10)}$$

ซึ่งสรุปได้ว่าพลังงานทั้งหมดในระนาบราบที่ผ่านจุด 0 จะมากขึ้นตามความยาวรัศมี

- <u>รูปตัดผิวอิสระของการไหลวนแบบบังคับ</u>



<u>ภาพที่ 11.7</u> รูปตัดผิวอิสระของการไหลวนแบบบังคับ

จากภาพที่ 11.7 พลังงานทั้งหมดที่เปรียบเทียบกับระนาบราบที่ผ่านจุด O ของสตรีมไลน์เส้นเดียวกันมีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับ

$$H = Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$$

พิจารณาจุด C ซึ่งอยู่บนผิวอิสระ โดยจุด C อยู่ห่างจากจุดต่ำสุดของส่วนโค้งในระนาบราบเท่ากับ r (ดูภาพ) จะได้

$$H = \frac{\omega^2 r^2}{g}$$

$$\frac{p}{\rho g} = 0 \text{ (สัมผัสกับอากาศ)}$$

และ $$\frac{v^2}{2g} = \frac{(\omega r)^2}{2g} = \frac{\omega^2 r^2}{2g} \quad (v = \omega r)$$

แทนค่าลงไปจะได้

$$\frac{\omega^2 r^2}{2g} = Z + 0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g}$$

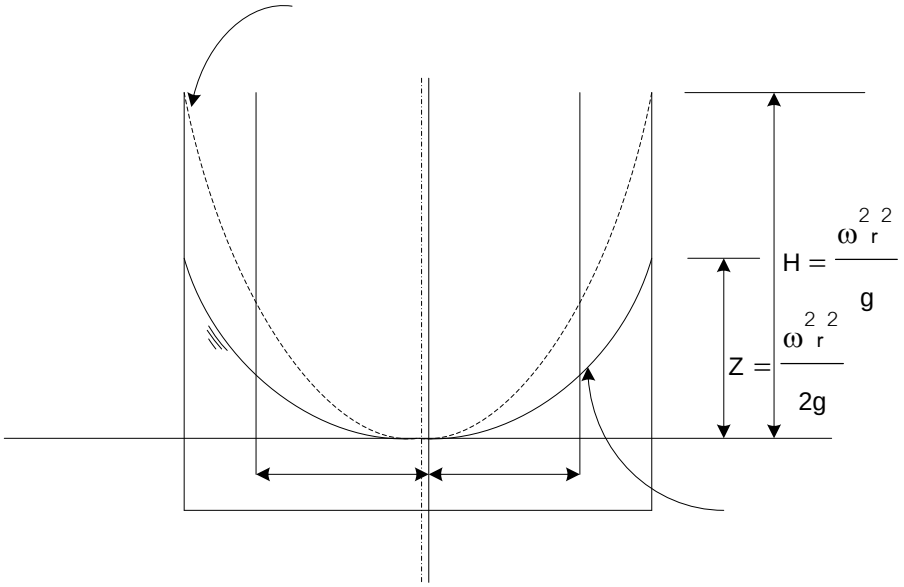
จะได้ $$Z = \frac{\omega^2 r^2}{2g}$$ ----------(11.11)

ซึ่งเป็นสมการพาราโบล่า

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า รูปตัดผิวอิสระของการไหลวนบังคับเป็นส่วนโค้งพาราโบล่าซึ่งมีจุดยอดอยู่ที่จุดต่ำสุดของส่วนโค้ง ฉะนั้นถ้าให้ระนาบราบที่ผ่านจุดต่ำสุดของส่วนโค้งเป็นระดับเปรียบเทียบจะได้ว่าที่ระยะห่างจากจุด θ เท่ากัน r ใด ๆ ค่า H จะเป็นสองเท่าของ Z

วิธีการทดลอง

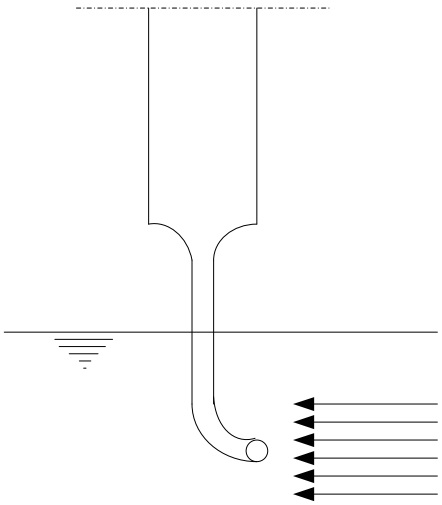
เทน้ำลงไปในถังใสรูปทรงกระบอก ประมาณครึ่งหนึ่งถึงสองในสามของความสูงของถัง เปิดสวิตซ์ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า ปรับความเร็วให้สูงสุด โดยเลื่อนปุ่มปรับความเร็วที่เครื่องมือควบคุมความเร็วไปตามนาฬิกาจนสุด รอให้น้ำในถังปรับตัวจนได้ผิวหน้าเป็นรูปการไหลวนบังคับ (Forced Vortex) ซึ่งอาจเป็นเวลาประมาณ 3-5 นาที สังเกตดูว่าจุดต่ำสุดของระดับผิวหน้าน้ำไม่เลื่อนลงต่ำกว่านั้นอีก จะแสดงว่ารูปตัดผิวอิสระน้ำอยู่คงที่แล้ว แต่ถ้าจุดต่ำสุดของระดับผิวหน้าน้ำลดลงเรื่อย ๆ อาจใช้วิธีเติมน้ำเข้าไปเพื่อไม่ให้ระดับผิวหน้าน้ำลดลงอยู่ใต้ปลายของหลอดปิโตดในภาพที่ 11.8 หรือลดความเร็วมาทางทวนนาฬิกา รอจนระดับผิวหน้าน้ำคงที่ แล้วจึงเริ่มไล่ฟองอากาศจากหลอดมาโนมิเตอร์ของหลอดปิโตด โดยใช้ลูกยางดูดอากาศออกจากปลายอิสระของหลอดมาโนมิเตอร์ เมื่อหมดฟองอากาศแล้วต้องถอดลูกยางออกให้ปลายอิสระของมาโนมิเตอร์สัมผัสกับบรรยากาศ มิฉะนั้นจะอ่านผลของการทดลองไม่ได้ การอ่างสเกลของหลอดปิโตดจากมาโนมิเตอร์จำเป็นต้องให้ปลายเปิดของหลอดปิโตดหันหน้าสู่ทิศทางการไหลวนของน้ำดังภาพที่ 11.9 ซึ่งจะเป็นทางใดทางหนึ่งของระยะจากศูนย์กลางของถังใสมายังขอบแต่เพียงทางเดียวเท่านั้น



ภาพที่ 11.8 รูปตัดผิวอิสระน้ำ

อ่านค่าทั้งสเกลนอนและตั้งเพื่อหาเส้นรูปตัดผิวอิสระน้ำ ในขณะที่แต่ละจุดที่อ่านหาเส้นระดับผิวหน้าน้ำก็อ่านสเกลมาโนมิเตอร์ สำหรับหลอดปิโตดไปด้วย การอ่านนี้ให้อ่านถี่ขึ้นเมื่อใกล้ศูนย์กลางของน้ำวน และการอ่านแต่ละครั้งต้องให้ปลายของหลอดปิโตดจุ่มอยู่ใต้ผิวหน้าอิสระของน้ำพอดี

ให้ถือเอาผิวหน้าน้ำและพลังงานรวม (Total Energy Head) ที่ r = 0 เป็นหลัก (Datum) และการอ่านครั้งต่อ ๆ ไปให้อ่านออกจากจุดนี้ วัดอัตราการหมุนของถังใสด้วยการจับเวลา โดยสังเกตการหมุนครบรอบได้จากเทปสีเขียวที่ปะไว้ข้างถัง



ภาพที่ 11.9 หลอดปิโตด

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 11.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

จำนวนรอบที่หมุน (รอบ) : _____

เวลา (วินาที) : _____

รัศมี (มม.)	การอ่านเครื่องมือวัดความลึก (Depth Gauge) (มม.)	การอ่านหลอดปิโตต (Pitot Tube) (มม.)
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
80		
100		
120		
135		

วิเคราะห์ผลการทดลอง

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Z, H และรัศมี และแสดงในรูปกราฟ

เอกสารอ้างอิง

โครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2549. **คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ EGCE 322 Hydraulic Engineering Laboratory**.

ไตรรัตน์ ศรีวัฒนา, ชูเกียรติ ทรัพย์ไพศาล และพงษ์ศักดิ์ เสริมสาธนสวัสดิ์. 2524. **ปฏิบัติการทางชลศาสตร์**. เอกสารวิชาการ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บทปฏิบัติการที่ 12

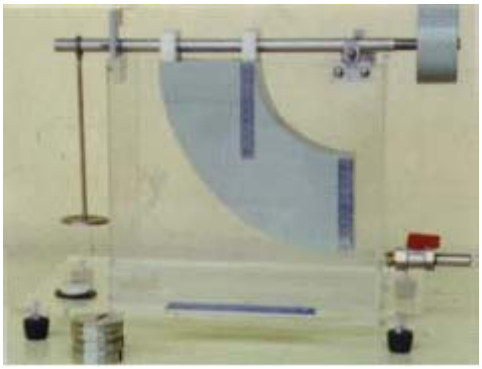
การหาจุดศูนย์กลางแรงดันของของไหล
(Center of Hydrostatic Pressure)

วัตถุประสงค์

เพื่อหาจุดศูนย์กลางแรงดันบนระนาบผิวตรงที่จมอยู่ในน้ำ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าจุดศูนย์กลางแรงดันที่คำนวณได้จากทฤษฎี

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ชุดทดลองสำหรับหาจุดศูนย์กลางแรงดัน โดยที่ชุดทดลองนี้จะใช้ร่วมกับโต๊ะชลศาสตร์หรือไม่ก็ได้ ลักษณะชุดทดลองเป็นไปตามภาพที่ 12.1



ภาพที่ 12.1 ชุดทดลองหาจุดศูนย์กลางแรงดัน

2) อุปกรณ์ประกอบในกรณีไม่ใช่ร่วมกับโต๊ะชลศาสตร์ได้แก่ สายยางเพื่อต่อนำน้ำจากท่อมาใส่ยังชุดทดลอง

ทฤษฎี

1. ความดันของของไหล ณ จุดใด ๆ เมื่อวัดจากผิวอิสระมีค่าเท่ากับน้ำหนักจำเพาะของของไหลนั้นคูณกับระยะในแนวดิ่งที่วัดจากผิวของของไหลไปยังจุดนั้นหรือ

$$P = \gamma h \qquad \text{----------(12.1)}$$

เมื่อ

P = ความดันของของไหล ณ จุดที่พิจารณา

γ = น้ำหนักจำเพาะของของไหล = ρg

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

h = ความลึกของของไหลเมื่อวัดจากผิวอิสระของของไหลในแนวดิ่งมายังจุดที่พิจารณา

2. ความดันของของไหลที่จุดใด 2 จุด มีระยะห่างกันในแนวดิ่งเท่ากับ h ค่าความดันที่จุดต่ำกว่าจะมีค่าเท่ากับความดันที่จุดสูงกว่าบวกด้วยค่าผลต่างของความดันระหว่าง 2 จุดนี้ กล่าวคือ

$$P_2 = P_1 + \gamma h \qquad \text{----------(12.2)}$$

เมื่อ

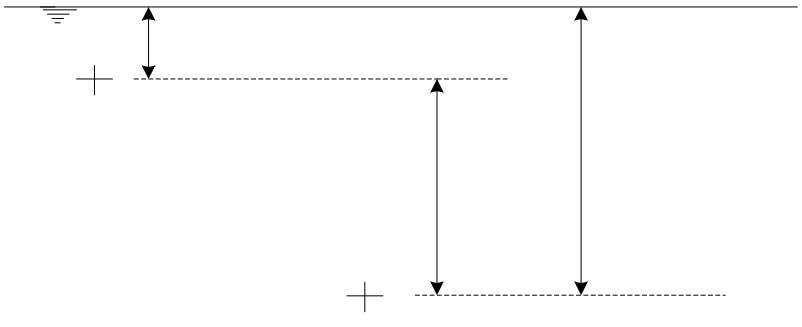
P_2 = ความดันที่จุด 2 ซึ่งอยู่ต่ำกว่าจุด 1

P_1 = ความดันที่จุด 1

γ = น้ำหนักจำเพาะของของไหล

h = ระยะห่างในแนวดิ่งระหว่างจุด 1 และ 2

จากสมการที่ 12.2 ถ้าจุด 1 อยู่ที่ผิวอิสระของของไหล และสัมผัสกับบรรยากาศเมื่อวัดความดันเป็นลักษณะความดันเกจ (Gauge Pressure) P_1 จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นสมการ 12.2 ก็จะเป็น $P_2 = \gamma h$ เหมือนกับสมการที่ 12.1



ภาพที่ 12.2 แสดงความดันที่จุดใด ๆ ของของไหล

3. แรงดันทั้งหมดของของไหลสถิตย์ที่กระทำต่อระนาบผิวตรงของวัตถุที่จมอยู่ในของไหลนั้นมีค่าเท่ากับผลคูณของความดันที่จุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่นั้นกับพื้นที่ผิวตรงที่จมอยู่ในของไหล

$$F = \gamma \bar{h} . A \qquad \text{----------(12.3)}$$

เมื่อ

F = ดันทั้งหมดที่กระทำต่อพื้นที่

γ = น้ำหนักจำเพาะของของไหล

$\bar{h}$ = ความลึกในแนวดิ่งวัดจากผิวของของไหลมายังจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ตรงผิวนั้น

2.4 ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงดัน (Center of Pressure, CP) แรงดันทั้งหมด (F) ที่กระทำต่อระนาบผิวตรงที่จมอยู่ในของไหลจะกระทำที่จุดศูนย์กลางแรงดัน (CP) ซึ่งหาได้จากสูตร (ดูภาพที่ 12.3 ประกอบ)

$$Y_p = \bar{Y} + \frac{I_{CG}}{\bar{Y}A} \qquad \text{----------(12.4)}$$

เมื่อ

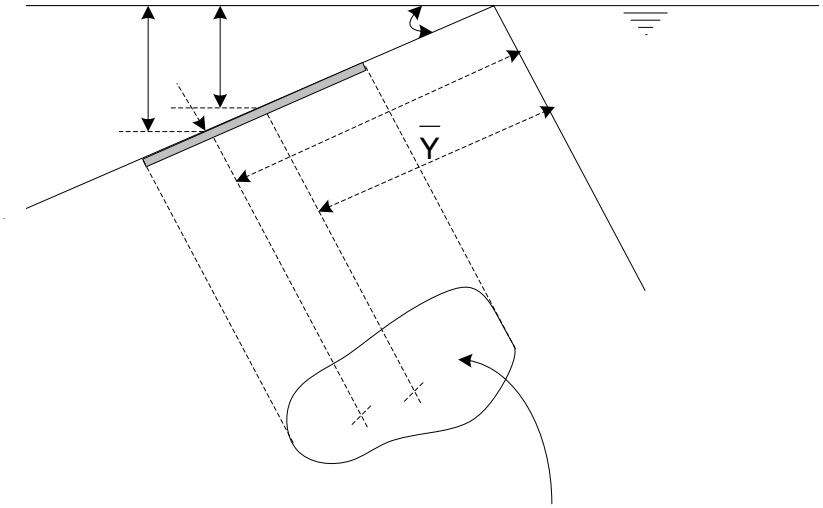
Y_p = ระยะที่วัดจากผิวของของไหลในแนวขนานกับผิวของวัตถุนั้นไปยังจุดศูนย์กลางแรงดัน (CP)

$\bar{Y}$ = ระยะที่วัดจากผิวของของไหลในแนวขนานกับผิวของวัตถุนั้นไปยังจุดศูนย์ถ่วง (CG) ของพื้นที่ผิวนั้น

I_{CG} = โมเมนต์อินเนอร์เชียร์ของพื้นที่ผิวที่จมอยู่ในของไหลนั้นรอบแกนที่ลากผ่านจุด CG ของพื้นที่นั้น

A = พื้นที่ผิวของวัตถุที่จมอยู่ในของไหล

สำหรับการวิเคราะห์ที่มาของสูตรต่าง ๆ ตามที่ปรากฏในสมการที่ 12.1, 12.2, 12.3 และ 12.4 สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากตำราหรือเอกสารเกี่ยวกลศาสตร์ของของไหลทั่วไป



ภาพที่ 12.3 พื้นที่ระนาบผิวตรงจมอยู่ในของไหล

จากภาพที่ 12.3 จะเห็นว่าแรงดันทั้งหมด (F) กระทำตั้งฉากกับพื้นที่ผิว ถ้าหากระนาบเอียงทำมุมกับผิวของของไหล $= \theta$ องศา และในทางปฏิบัตินิยมวัดระยะต่าง ๆ ในลักษณะเป็นแนวดิ่งลงไปจากผิวของของไหล จะได้ว่า

$$h_p = Y_p \sin\theta \qquad \text{----------(12.5)}$$

$$\bar{h} = \bar{Y} \sin\theta \qquad \text{----------(12.6)}$$

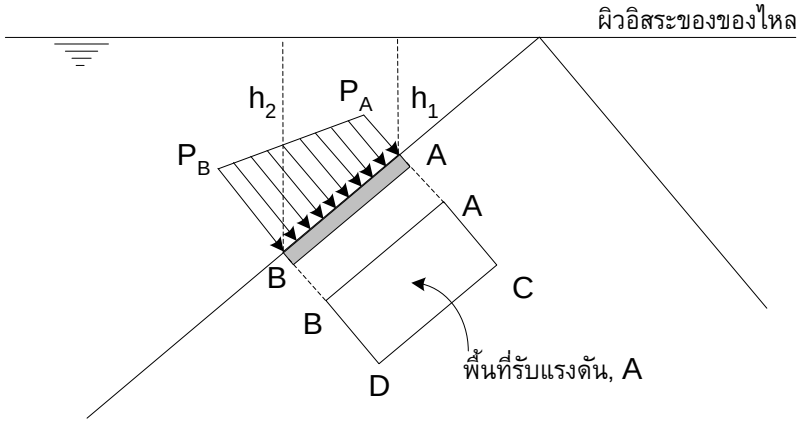
นั่นคือถ้าระนาบดังกล่าววางตั้งฉากกับผิวของของไหล ($\theta = 90^o$) จะได้ $Y_p = h_p$ และ $\bar{Y} = \bar{h}$

$$h_p = \bar{h} + \frac{I_{CG}}{\bar{h}A} \qquad \text{----------(12.7)}$$

สมการที่ 12.7 ใช้สำหรับคำนวณหาค่าจุดศูนย์กลางแรงดัน กรณีพื้นที่ผิวตรงวางอยู่ในแนวดิ่ง

2.5 ไดอะแกรมแรงดันของของไหลที่กระทำต่อพื้นที่ผิวตรง จากสมการที่ 12.1 จะเห็นว่าความดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรง โดยที่ความดันในแต่ละจุดจะมีค่า P = γh รูปร่างการแปรค่าความดันดังกล่าวนี้เราเรียกว่า ไดอะแกรมความดันของของไหล ดังนั้นหากมีพื้นที่ผิวใด

ๆ จมอยู่ในของไหล ก็สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมของความดัน และคำนวณหาเป็นความดันรวมที่กระทำต่อพื้นที่ผิวนั้น ต่อจากนั้นคำนวณหาแรงดันรวมได้



ภาพที่ 12.4 ไดอะแกรมความดัน

จากภาพที่ 12.4 ที่จุด A มีความลึก h_1 ความดัน $P_A = \gamma h_1$ ที่จุด B มีความลึก h_2 ความดัน $P_B = \gamma h_2$ ความดันที่กระทำมีทิศตั้งฉากกับพื้นที่ผิวนั้น พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู P_AP_BAB เรียกว่า ไดอะแกรมความดันของแนว AB ความดันลัพธ์ของแนว AB มีค่าเท่ากับพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู P_AP_BAB นี้ นั่นคือ

$$P_R = \frac{1}{2}\left(P_A + P_B\right) \times \text{ระยะ AB} \qquad \text{----------(12.8)}$$

เมื่อ

P_R = ความดันลัพธ์ที่กระทำต่อแนว AB

ความดันลัพธ์ที่กระทำต่อพื้นที่ ABCD คือ

$$F_R = P_R \times AC = \frac{1}{2}\left(\gamma h_1 + \gamma h_2\right) AB \times AC$$

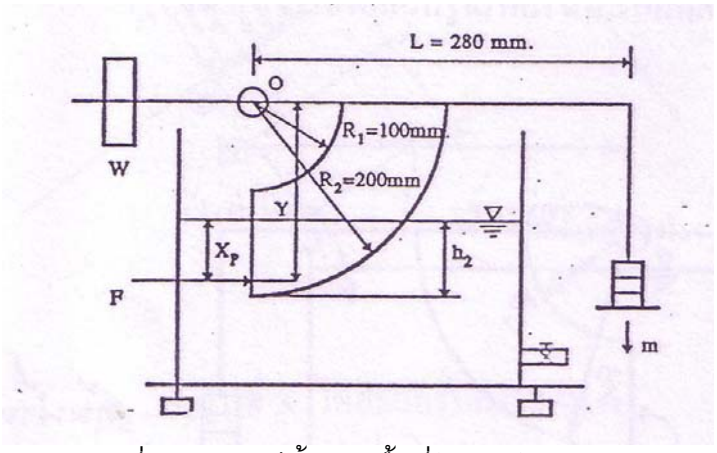
ในที่นี้ $AB \times AC = A$ = พื้นที่ของระนาบ

ดังนั้น $F_R = \frac{1}{2}\left(h_1 + h_2\right)A$

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง หากต้องการหาแรงดันกระทำต่อพื้นที่ผิวเรียบใด ๆ ที่จมอยู่ในของไหลสามารถคำนวณได้จากปริมาตรของความดันทั้งหมดที่กระทำต่อพื้นที่ผิวนั้น

วิธีการคำนวณหาจุดศูนย์กลางแรงดันที่ได้จากการทดลอง (Xp) แบ่งเป็น 2 กรณีคือ

- กรณีน้ำท่วมพื้นที่รับแรงดันบางส่วน



ภาพที่ 12.5 กรณีน้ำท่วมพื้นที่รับแรงดันบางส่วน

จากสมการ $F = \gamma \bar{h} A = \rho g \bar{h} A$

เมื่อ

ρ = 1,000 กก./ม.^{3}

g = 9.81 ม./วินาที^{2}

$\bar{h}$ = ความลึกในแนวดิ่งจากผิวของน้ำไปยังจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่รับแรงดัน = h/2 ม.

A = พื้นที่รับแรงดันน้ำ = 0.075h^2 ม.^{2} (ความกว้างของพื้นที่ (B) = 0.075 ม.)

จากภาพที่ 12.5 เมื่อคานอยู่ในนิ่ง, $\sum M_0 = 0$ (ความกว้างของพื้นที่ (B) = 0.075 ม.)

$$FY = mgL \qquad \text{----------(12.9)}$$

$$Y = \frac{mgL}{F} \qquad ; F = \gamma \bar{h} A = \rho g \bar{h} A$$

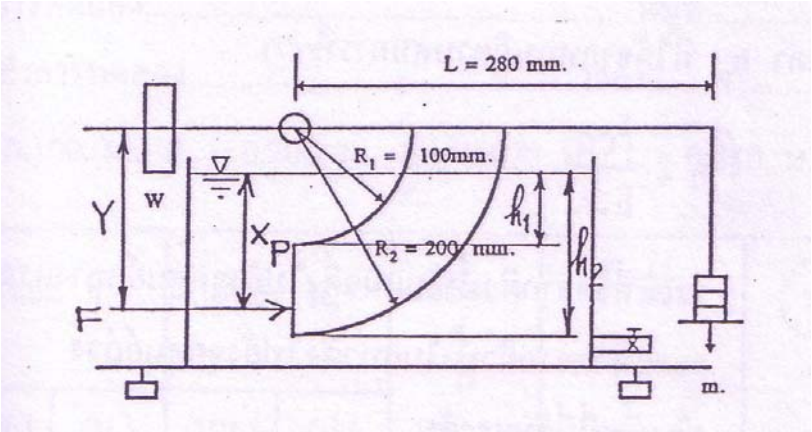
$$Y = \frac{mgL}{\gamma \bar{h} A} = \frac{mL}{\rho \bar{h} A}$$

แทนค่า $\bar{h} = \frac{h_2}{2}$ จะได้ $Y = \frac{2mL}{\rho h_2 A}$

จากภาพ $Y = R_2 - (h_2 - X_p)$ ม.

$$R_2 - (h_2 - X_p) = \frac{2mL}{\rho h_2 A} + h_2 - R_2 \quad \text{----------(12.10)}$$

- กรณีน้ำท่วมพื้นที่รับแรงดันทั้งหมด



ภาพที่ 12.6 กรณีน้ำท่วมพื้นที่รับแรงดันทั้งหมด

จากสมการ $F = \gamma \bar{h} A$

จากภาพที่ 12.6 $\bar{h} = h_1 + \frac{(R_2 - R_1)}{2}$ แต่ $R_2 = 0.20$ ม., $R_1 = 0.10$ ม.

$$A = (R_2 - R_1)0.075 = 7.5x10^{-3} \text{ ม.}^2$$

แทนค่าลงในสมการ

$$Y = \frac{mgL}{\rho g(h_1 + 0.05)x7.5x10^{-3}} = \frac{133.33mL}{\rho(h_1 + 0.05)}$$

จากรูป $Y = X_p + (R_1 - h_1)$

ดังนั้น $X_p + (R_1 - h_1) = \frac{133.33mL}{\rho(h_1 + 0.05)}$

$$X_p = \frac{133.33mL}{\rho(h_1 + 0.05)} - R_1 + h_1 \quad \text{----------(12.11)}$$

เมื่อ X_p, L, R_1, h_1, h_2 หน่วยเป็นเมตร และ m มีหน่วยเป็นกิโลกรัม

วิธีการทดลอง

1) วัดระยะ (หรือใช้ค่าจากข้อมูลของบริษัทผู้ผลิต) ค่า R_1, R_2, L, B บันทึกลงในตารางที่ 12.1

2) ในขณะที่ชุดทดลองยังไม่มีน้ำ และยังไม่ได้วางน้ำหนัก m ลงบนชุดทดลอง ให้ปรับเลื่อนตุ้มน้ำหนัก W จนคานอยู่ในแนวระดับ

3) นำตุ้มน้ำหนัก m ขนาด 100 กรัม มาวางถ่วงลงไปทำให้คานกระดกลง ทำการเติมน้ำลงไปในชุดทดลองทีละน้อยจนคานกระดกกลับคืนมาอยู่ที่แนวระดับดังเดิม ทำการบันทึกระดับน้ำโดยอ่านจากสเกลด้านข้างชุดทดลองเป็นระยะ h_1 และ h_2 พร้อมกับบันทึกค่าน้ำหนัก m ในตารางที่ 12.1

4) เพิ่มน้ำหนัก m ลงไปครั้งละ 50 กรัม ในแต่ละครั้งเพิ่มน้ำหนัก m เติมน้ำเข้าสู่ชุดทดลองจนคานอยู่ในแนวระดับ พร้อมกับบันทึกค่า m, h_1 และ h_2 ทุกครั้งลงในตารางที่ 12.1 ทำเช่นนี้ให้ได้ข้อมูลอย่างน้อย 10 ค่า หรือทดลองจนกว่าน้ำจะล้นชุดทดลอง

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 12.1 ผลการหาจุดศูนย์กลางแรงดันของของไหล

R_1 = _____ ม. R_2 = _____ ม. B = _____ม. L = _____ม.

ครั้งที่	น้ำหนัก m (กก.)	ระยะ h_1		ระยะ h_2		ระยะ $\bar{h}$ (มม.)	พื้นที่รับแรงดัน ,A(มม.^{2})	H (มม.)	$I_{CG} = \frac{BH^3}{12}$ (มม.^{4})	Ah^2 (มม.)^3
		(มม.)	(ม.)	(มม.)	(ม.)					

ตารางที่ 12.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์

ครั้งที่	X_p ทดลอง (มม.)	h_p ทฤษฎี (มม.)	หมายเหตุ

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณหาค่า h_p ที่ได้จากทฤษฎีตามสมการที่ 12.7

$$h_p = \bar{h} + \frac{I_{CG}}{\bar{h}A} \qquad \text{----------(12.9)}$$

เมื่อ

h_p = ระยะที่วัดจากผิวน้ำในแนวดิ่งไปยังศูนย์กลางแรงดัน

$\bar{h}$ = ระยะที่วัดจากผิวน้ำในแนวดิ่งไปยังศูนย์ถ่วงของพื้นที่ที่รับแรงดัน

I_{CG} = โมเมนต์อินเนอร์เชียร์ของพื้นที่ที่รับแรงดันรอบแกนแนวราบซึ่งผ่านจุด CG

$= \frac{BH^3}{12}$

เมื่อ

B = ความกว้างของพื้นที่รับแรงดัน

H = ความลึกของพื้นที่ส่วนที่รับแรงดัน

A = พื้นที่รับแรงดัน = BH

บันทึกค่า h_p ลงในตารางที่ 12.2

2) คำนวณหาค่า X_p ที่ได้จากการทดลองในแต่ละครั้งที่เปลี่ยนน้ำหนัก ตามสมการที่ 12.10 และ 12.11 บันทึกในตารางที่ 12.2

3) นำค่า h_p ในข้อ 1) และ X_p ในข้อ 2) มาพล๊อตกราฟ

4) ใช้วิธีการทางสถิติเพื่อตรวจสอบว่าค่า h_p จากทฤษฎี กับ X_p จากการทดลองแตกต่างกันอย่างไร

เอกสารอ้างอิง

ไตรรัตน์ ศรีวัฒนา, ชูเกียรติ ทรัพย์ไพศาล และพงษ์ศักดิ์ เสริมสาธนสวัสดิ์. 2524. **ปฏิบัติการทางชลศาสตร์**. เอกสารวิชาการ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิมิตร เฉิดฉันท์พิพัฒน์. **ปฏิบัติการกลศาสตร์ของของไหล**. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Essom Company Limited. 1999. **Technical Training Equipment**.